

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES  
PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum  
Internationales Büro



(43) Internationales Veröffentlichungsdatum  
5. April 2001 (05.04.2001)

PCT

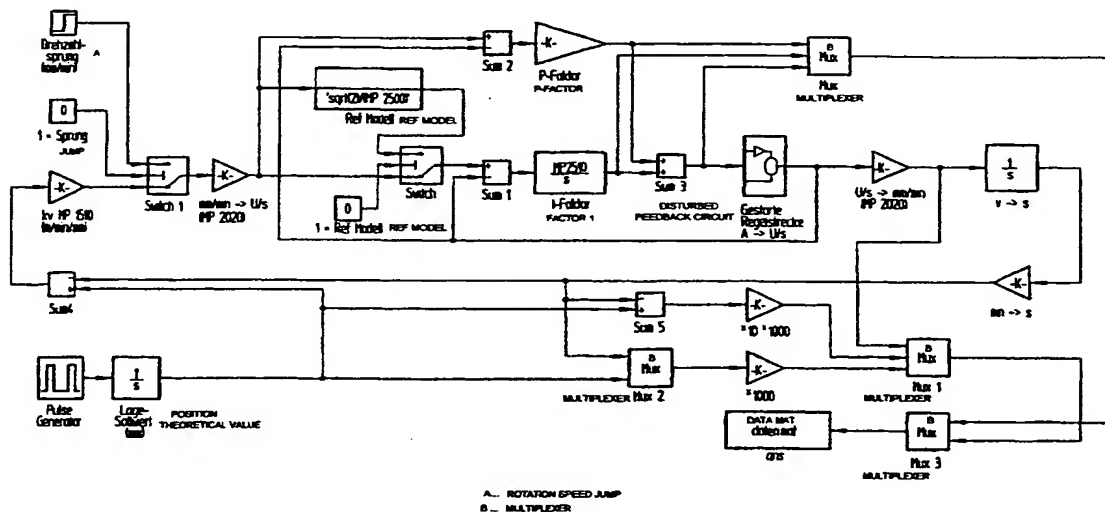
(10) Internationale Veröffentlichungsnummer  
**WO 01/23967 A1**

- (51) Internationale Patentklassifikation<sup>7</sup>: **G05B 13/04** (71) **Anmelder** (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von US): **DR. JOHANNES HEIDENHAIN GMBH** [DE/DE]; Postfach 12 60, 83292 Traunreut (DE).
- (21) Internationales Aktenzeichen: **PCT/EP00/09232** (72) **Erfinder; und**
- (22) Internationales Anmeldedatum:  
21. September 2000 (21.09.2000) (75) **Erfinder/Anmelder (nur für US): KERNER, Norbert** [DE/DE]; Zachersdorferstrasse 45, 83374 Traunwalchen (DE).
- (25) Einreichungssprache: **Deutsch** (81) **Bestimmungsstaaten (national):** DE, JP, US.
- (26) Veröffentlichungssprache: **Deutsch** (84) **Bestimmungsstaaten (regional):** europäisches Patent (AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE).
- (30) Angaben zur Priorität:  
199 45 748.4 24. September 1999 (24.09.1999) DE

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: METHOD FOR DETERMINING TIME CONSTANTS OF A REFERENCE MODEL IN A CASCADE REGULATING CIRCUIT

(54) Bezeichnung: VERFAHREN ZUR ERMITTLUNG VON ZEITKONSTANTEN EINES REFERENZMODELLES IN EINER KASKADIERTEN REGELUNGSANORDNUNG



(57) Abstract: The invention relates to a method for determining at least one time constant of a reference model which is located in a regulating circuit of a machine positioned between a position regulator having an amplification factor  $k_V$  and a rotation speed regulator. Said rotation speed regulator comprises a proportional branch and an integral branch. The reference model is embodied as a 2<sup>nd</sup> order delay member and essentially reproduces at least the behavior of the closed regulating circuit without taking into account an integral component. An optimized value of a time constant pertaining to the reference model is determined and depends on a detected vibration frequency of non-shock absorbed machine vibrations.

(57) Zusammenfassung: Es wird ein Verfahren zur Ermittlung von mindestens einer Zeitkonstanten eines Referenzmodelles angegeben, das in einer kaskadierten Regelungsanordnung einer Maschine zwischen einem Lageregler mit einem Verstärkungsfaktor  $k_V$  und einem Drehzahlregler angeordnet ist. Der Drehzahlregler umfasst einen Proportional- und einen Integralzweig. Das Referenzmodell ist als Verzögerungsglied

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

WO 01/23967 A1



**Veröffentlicht:**

- Mit internationalem Recherchenbericht.
- Vor Ablauf der für Änderungen der Ansprüche geltenden Frist; Veröffentlichung wird wiederholt, falls Änderungen eintreffen.

*Zur Erklärung der Zweibuchstaben-Codes, und der anderen Abkürzungen wird auf die Erklärungen ("Guidance Notes on Codes and Abbreviations") am Anfang jeder regulären Ausgabe der PCT-Gazette verwiesen.*

2. Ordnung ausgebildet und bildet im wesentlichen zumindest das Verhalten des geschlossenen Drehzahlregelkreises ohne Berücksichtigung des Integralanteiles nach. Ein optimierter Wert einer Zeitkonstanten des Referenzmodelles wird in Abhängigkeit einer erfassten Schwingungsfrequenz einer ungedämpften Maschinenschwingung ermittelt.

VERFAHREN ZUR ERMITTLUNG VON ZEITKONSTANTEN EINES REFERENZMODELLES IN  
EINER KASKADIERTEN REGELUNGSANORDNUNG

=====

Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren zur Ermittlung von mindestens einer Zeitkonstanten eines Referenzmodelles in einer kaskadierten Regelungsanordnung nach dem Oberbegriff des Anspruches 1.

In numerisch gesteuerten Werkzeugmaschinen wird üblicherweise eine kaskadierte Regelungsstruktur, bestehend aus Lage-, Drehzahl- und Stromregler eingesetzt. Der dem Lageregler nachgeordnete Drehzahlregler ist in der Regel als PI-Drehzahlregler ausgebildet, der einen  
5 Proportionalzweig (P) und einen Integralzweig (I) umfasst. Aufgrund des Einflusses des Integralzweiges des Drehzahlreglers wird der Phasengang des vorgeordneten Lagereglers verschlechtert. Daher muss als Konsequenz der Verstärkungsfaktor  $k_V$  des Lagereglers a priori reduziert werden, um Schwingungen in den durch die Regelung geregelten Antriebssystemen der  
10 Werkzeugmaschine zu vermeiden. Wünschenswert ist jedoch grundsätzlich ein möglichst großer Verstärkungsfaktor  $k_V$  des Lagereglers.

Zur Lösung dieser Probleme ist im Seminarvortrag von P. Ernst, G. Heinemann mit dem Titel „Optimierte Achsregelungen mit durchgängig  
15 offenen CNC-Steuerungen“ (ISW Lageregelseminar 1999; 26., 27.3.1999) in Kapitel 2.2 bereits vorgeschlagen worden, dem Drehzahlregler ein Referenzmodell vorzuordnen. Das Referenzmodell, ausgebildet als Verzögerungsglied 2. Ordnung, ist dem Verhalten des geschlossenen Drehzahlreglers ohne Integralanteil angepasst. Auf diese Art und Weise  
20 lässt sich der ungünstige Einfluss des Integralanteiles auf das Führungsverhalten des Drehzahlreglers eliminieren bzw. zumindest minimieren. Die erwünschte Ausregelung von Störungen ohne Integralanteil bleibt jedoch weiterhin voll erhalten. In Bezug auf die geeignete Parametrierung, insbesondere die Bestimmung geeigneter Zeitkonstanten,

eines entsprechenden Referenzmodelles 2. Ordnung finden sich in der angegebenen Literaturstelle jedoch keine weiteren Hinweise.

5 Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es daher, ein Verfahren zur Ermittlung von mindestens einer Zeitkonstanten eines Referenzmodelles 2. Ordnung anzugeben, welches in einer kaskadierten Regelungsanordnung einer Maschine zwischen einem Lageregler und einem Drehzahlregler angeordnet ist und ein optimiertes Führungsverhalten der Regelungsanordnung sicherstellt.

10

Diese Aufgabe wird gelöst durch ein Verfahren mit den Merkmalen im kennzeichnenden Teil des Anspruches 1.

15

Vorteilhafte Ausführungsformen des erfindungsgemäßen Verfahrens ergeben sich aus den Maßnahmen in den abhängigen Ansprüchen.

20

Über das erfindungsgemäße Verfahren ist nunmehr die Parametrierung eines geeigneten Referenzmodelles 2. Ordnung für verschiedenste Maschinentypen möglich. Hierbei stellt das resultierende Referenzmodell jeweils sicher, dass zumindest der unerwünschte Einfluss des Integralanteiles des Drehzahlreglers auf das Führungsverhalten eliminiert wird.

25

Je nach Maschinentyp werden eine Zeitkonstante oder zwei Zeitkonstanten erfindungsgemäß ermittelt, die das Verhalten des Referenzmodelles bestimmen und damit das Führungsverhalten der Regelungsanordnung im eigentlichen Regelungsbetrieb beeinflussen. Grundsätzlich wird erfindungsgemäß jedoch zumindest die sog. zweite Zeitkonstante des Referenzmodelles in Abhängigkeit einer erfassten Schwingungsfrequenz

30

einer ungedämpften Maschinenschwingung ermittelt.

Über das erfindungsgemäße Vorgehen zur Bestimmung der Zeitkonstanten können nunmehr überraschenderweise bzw. entgegen theoretischen Überlegungen auch Regelstrecken mit Totzeiten und Verzögerungsgliedern

für Maschinen kompensiert werden, die theoretisch Referenzmodelle höherer Ordnung benötigen würden; insbesondere gilt dies für die oben erwähnten zweite Kategorie von nicht-steifen Maschinen mit dominanter Eigenfrequenz. Für derartige Maschinen würde das Bestimmen von

5 theoretisch exakten Referenzmodellen  $n$ -ter Ordnung ( $n > 2$ ) mit einem sehr großen Aufwand verbunden sein. Demgegenüber kann durch die Verwendung von Verzögerungsgliedern zweiter Ordnung als Referenzmodell, deren Zeitkonstanten erfindungsgemäß bestimmt werden, der resultierende Aufwand zur Parametrierung des Referenzmodelles gering

10 gehalten werden.

Das erfindungsgemäße Verfahren kann sowohl manuell als auch automatisiert erfolgen.

15 Weitere Vorteile sowie Einzelheiten des erfindungsgemäßen Verfahrens ergeben sich aus der nachfolgenden Beschreibung von Ausführungsbeispielen anhand der beiliegenden Figuren.

Dabei zeigt

20

Figur 1 eine Blockschaltbild-Darstellung eines Teiles der kaskadierten Regelungsstruktur einer numerisch gesteuerten Werkzeugmaschine;

25

Figur 2a und 2b je ein Flussdiagramm zur Erläuterung der erfindungsgemäßen Ermittlung der Zeitkonstanten eines Referenzmodelles 2. Ordnung,

30

Figur 3 – 21 jeweils verschiedene Darstellungen, die im ANHANG näher erläutert werden.

Figur 1 zeigt in stark schematisierter Form eine Blockschaltbild-Darstellung eines Teiles der kaskadierten Regelungsstruktur einer numerisch

gesteuerten Werkzeugmaschine, wie sie z.B. in ähnlicher Form aus der oben diskutierten Literaturstelle bekannt ist.

Der dargestellte Teil der Regulationsstruktur umfasst einen Lageregler 10 sowie einen nachgeordneten Drehzahlregler 20. Dem Drehzahlregler 20 nachgeordnet ist die eigentliche Regelstrecke 30, die lediglich schematisch angedeutet wird. Der Drehzahlregler ist im vorliegenden Beispiel als PI-Regler (Proportional-Integral-Regler) ausgebildet; der Integralzweig 21 sowie der Proportionalzweig 22 des Drehzahlreglers 20 sind in Figur 1 separat voneinander dargestellt. Zwischen dem Lageregler 10 und dem Drehzahlregler 20 ist ein Referenzmodell 40 angeordnet, das als Verzögerungsglied 2. Ordnung ausgebildet ist, d.h. als sogenanntes PT2-Glied. Das Referenzmodell 40 ist dem Verhalten des geschlossenen Drehzahlreglers 20 ohne Integralanteil nachgebildet und gewährleistet derart, dass zumindest der unerwünschte Einfluss des Integralanteiles bzw. Integralzweiges 21 auf das Führungsverhalten des Drehzahlreglers 20 eliminiert wird. Wie oben bereits angedeutet können über das nachfolgend noch zu erläuternde Vorgehen überraschenderweise auch Referenzmodelle parametrisiert werden, die Regelstrecken mit Totzeiten und Verzögerungsgliedern kompensieren. Theoretisch müssten für derartige Regelstrecken Referenzmodelle mit Ordnungen  $n > 2$  parametrisiert werden, was relativ aufwendig wäre.

Die Übertragungsfunktion  $H(s)$  des als Verzögerungsglied 2. Ordnung ausgebildeten Referenzmodelles 40 ergibt sich in bekannter Art und Weise gemäß nachfolgender Gleichung (1):

$$H(s) = K / (1 + T1 * s + (T2)^2 * s^2) \quad \text{Gl. (1)}$$

Entscheidend für die Auslegung bzw. Parametrierung des Referenzmodelles 40 sind die beiden Zeitkonstanten  $T1$  und  $T2$ . Diese müssen in Abhängigkeit der jeweiligen Maschinen- bzw. Regelungs-Gegebenheiten ermittelt werden.

Entgegen theoretischen Überlegungen hat sich nun gezeigt, dass die Verwendung von Referenzmodellen 2. Ordnung, deren Zeitkonstanten  $T1$

und T2 erfindungsgemäß bestimmt werden, selbst dann möglich ist, wenn das jeweilige System eigentlich über ein Referenzmodell höherer Ordnung  $n$ , d.h.  $n > 2$ , nachgebildet werden müsste. Die mathematisch exakte Abbildung eines derartigen, komplexen Systemes durch ein entsprechendes Referenzmodell  $n$ -ter Ordnung würde jedoch grundsätzlich einen extrem hohen Rechenaufwand verursachen. In der Praxis hat dies zur Folge, dass durch die Verwendung eines Referenzmodelles 2. Ordnung, dessen Zeitkonstanten T1 und T2 erfindungsgemäß bestimmt werden, auch das Führungsverhalten des Drehzahlreglers 20 für Maschinen optimiert werden kann, die zur bereits oben diskutierten zweiten Kategorie gehören. Hierbei wird durch den Einsatz eines erfindungsgemäß parametrisierten Referenzmodelles 2. Ordnung in diesen Systemen nicht nur der Einfluss des Integralzweiges des Drehzahlreglers eliminiert, sondern darüberhinaus noch der Einfluss zusätzlicher Verzögerungen bzw. Totzeiten in der Regelstrecke minimiert. Überraschenderweise lassen sich in derartigen Systemen mit erfindungsgemäß parametrisierten Referenzmodellen 2. Ordnung auch Verstärkungsfaktoren  $k_V$  verwenden, die größer sind als mögliche Verstärkungsfaktoren  $k_V$  bei nicht-vorhandenem bzw. ausgeschaltetem Integralzweig im Drehzahlregler.

20

Anhand der Flussdiagramme in den Figuren 2a und 2b sei nunmehr das erfindungsgemäße Vorgehen zur Ermittlung der Zeitkonstanten T1, T2 für das Referenzmodell 2. Ordnung erläutert.

Im ersten Teil des nachfolgend erläuterten Verfahrens, dargestellt in Figur 2a, wird hierbei zunächst die zweite Zeitkonstante T2 bzw. ein entsprechend optimierter Wert T2\_OPT der zweiten Zeitkonstanten T2 ermittelt.

In einem ersten Verfahrensschritt S10 erfolgt zunächst die Bestimmung bzw. Vorgabe von Startwerten T1\_0, und T2\_0, für die erste und zweite Zeitkonstante T1, T2. Im vorliegenden Beispiel werden die Startwerte T1\_0, und T2\_0, gemäß T1\_0 = 0 und T2\_0 = 0 gewählt. Für das Gesamtsystem bedeutet diese Wahl der Startwerte T1\_0, und T2\_0, letztlich, dass das Referenzmodell 2. Ordnung in der Regelungsanordnung ausgeschaltet wird bzw. nicht aktiv ist.

Nachfolgend wird in den Schritten S20 und S30 der Verstärkungsfaktor  $k_V$  des Lagereglers schrittweise erhöht und nach jeder Erhöhung überprüft, ob bereits eine Schwingung der jeweiligen Maschine erkennbar ist. Dies erfolgt  
5 solange, bis bei einem ersten maximalen Verstärkungsfaktor  $k_{V_{max1}}$  eine nahezu ungedämpfte Schwingung der Maschine mit einer bestimmten Schwingungsfrequenz  $f_{s1}$  registrierbar ist.

Ist eine entsprechende ungedämpfte Schwingung der Maschine  
10 registrierbar, so wird gemäß dem Verfahrensschritt S40 die zugehörige Schwingungsfrequenz  $f_{s1}$  gemessen bzw. bestimmt.

Anschließend können im Verfahrensschritt S50 die beiden optimierten Werte  $T2\_OPT$  und  $T1\_OPT$  für die beiden Zeitkonstanten  $T1$ ,  $T2$  bestimmt  
15 werden. Hierbei lässt sich der optimierte Wert  $T2\_OPT$  für die zweite Zeitkonstante  $T2$  als Funktion der in Schritt S40 ermittelten Schwingungsfrequenz  $f_{s1}$  bestimmen, d.h.

$$T2\_OPT = f(f_{s1}) = 1 / (2 * \pi * f_{s1}) \quad \text{Gl. (2).}$$

20

Der optimierte Wert  $T1\_OPT$  für die erste Zeitkonstante  $T1$  ergibt sich aus vorgegebenen System-Parametern gemäß folgender Beziehung:

$$T1\_OPT = (J_L * 2 * \pi) / (k_P * K_{MC}) \quad \text{Gl. (3),}$$

25

wobei  $J_L$ : Lastmoment,

$k_P$ : Verstärkungsfaktor des Proportionalzweiges des Drehzahlreglers,

$K_{MC}$ : Motorkonstante.

30 Nachfolgend wird in den Verfahrensschritten S60 – S85 überprüft, ob die vorher ermittelten Zeitkonstanten  $T1$ ,  $T2$  des Referenzmodelles 2. Ordnung das gewünschte Führungsverhalten im Regelungsbetrieb gewährleisten. Zudem wird in diesen Verfahrensschritten ein maximaler Verstärkungsfaktor



kV des Lagereglers für die optimierten Zeitkonstanten T1\_OPT, T2\_OPT bestimmt.

Hierzu wird im Verfahrensschritt S60 zunächst überprüft, ob im System bei  
 5 der Verwendung der vorher ermittelten optimierten Werte T1\_OPT, T2\_OPT  
 und dem im Schritt S30 ermittelten ersten maximalen Verstärkungsfaktor  
 $kV_{max1}$  eine ungedämpfte Schwingung der Maschine resultiert.

Ist dies nicht der Fall, so wird gemäß den Verfahrensschritten S70 und S80  
 10 der Verstärkungsfaktor kV schrittweise solange erhöht, bis eine  
 ungedämpfte Maschinenschwingung bei einem Verstärkungsfaktor  $kV_{max2}$   
 registrierbar ist. Der derart ermittelte maximale Verstärkungsfaktor  $kV_{max2}$ ,  
 bei dem in Verbindung mit den Zeitkonstanten T1\_OPT und T2\_OPT des  
 Referenzmodelles 2. Ordnung eine ungedämpfte Maschinenschwingung  
 15 auftritt, wird anschließend im Verfahrensschritt S85 noch mit einem  
 Sicherheitsfaktor  $K < 1$  multipliziert. Hieraus ergibt sich dann der für ein  
 stabiles System im Regelungsbetrieb verwendbare optimierte  
 Verstärkungsfaktor  $kV_{OPT}$  für den Lageregler, d.h.

$$20 \quad kV_{OPT} = K * kV_{max2} \quad (Gl. 4).$$

Der Sicherheitsfaktor K kann z.B.  $K = 0.6$  gewählt werden, um derart eine  
 ausreichende Stabilität des Lagereglers sicherzustellen.

Ergibt sich im Verfahrensschritt S60 hingegen, dass bei der Verwendung der  
 25 vorher optimierten Zeitkonstanten T1\_OPT, T2\_OPT im Referenzmodell und  
 dem Verstärkungsfaktor  $kV_{max1}$  bereits eine ungedämpfte  
 Maschinenschwingung bei einer Schwingungsfrequenz  $f_{s2}$  resultiert, so wird  
 die Schwingungsfrequenz  $f_{s2}$  ermittelt und im Verfahrensschritt S65 erneut  
 30 eine optimierte Zeitkonstante T2\_OPT als Funktion der  
 Schwingungsfrequenz  $f_{s2}$  bestimmt gemäß

$$T2\_OPT = f(f_{s2}) = 1 / (2 * \pi * f_{s2}) \quad Gl. (2').$$

Ggf. wird das Bestimmen einer optimierten Zeitkonstante  $T2\_OPT$  in den Verfahrensschritten S60 und S65 mehrmals wiederholt, bis letztlich bei den gewählten Parametern  $T1\_OPT$ ,  $T2\_OPT$  und  $kV_{max1}$  keine ungedämpfte Maschinenschwingung mehr registrierbar ist.

5

Im Fall von Maschinen der ersten Kategorie ist nach diesem Vorgehen das Referenzmodell zweiter Ordnung grundsätzlich parametrisiert, d.h. die beiden Zeitkonstanten  $T1$  und  $T2$  ermittelt. Soll die Regelungsstruktur einer Maschine der zweiten Kategorie optimiert werden, so sind weitere  
10 Verfahrensschritte erforderlich, um insbesondere die erste Zeitkonstante  $T1$  des Referenzmodells geeignet zu optimieren. Dies sei nachfolgend anhand der Figur 2b erläutert.

Selbstverständlich können die nachfolgenden Schritte zur Ermittlung einer  
15 geeigneten ersten Zeitkonstante  $T1$  auch bei den erwähnten Maschinen der ersten Kategorie durchgeführt werden, um derart zu überprüfen, ob der gemäß obiger Gl. (3) eingestellte Wert für  $T1\_OPT$  ein akzeptables Systemverhalten liefert.

20 So wird zur Ermittlung eines optimierten Wertes  $T1\_OPT'$  der ersten Zeitkonstante  $T1$  im Verfahrensschritt S90 zunächst ein zweiter Startwert  $T1_{02}$  für die erste Zeitkonstante  $T1$  festgelegt. Hierbei wird als zweiter Startwert  $T1_{02}$  der gemäß Gl. (3) in Schritt S50 bestimmte Wert für  $T1$  verwendet, d.h.  $T1_{02} = T1\_OPT$ .

25

Nachfolgend wird gemäß Verfahrensschritt S100 die erste Zeitkonstante  $T1$  verändert, z.B. erhöht und im Verfahrensschritt S120 anschließend überprüft, ob bereits wieder eine ungedämpfte Maschinenschwingung registrierbar ist. Neben dem Erhöhen der ersten Zeitkonstante  $T1$  im Schritt  
30 S100 wäre grundsätzlich auch denkbar, dass diese verringert wird.

Solange keine ungedämpfte Maschinenschwingung registrierbar ist, wird gemäß den Verfahrensschritten S110 und S120 schrittweise der Verstärkungsfaktor  $kV$  bis zu einem Verstärkungsfaktor  $kV_{max3}$  erhöht, bei dem eine ungedämpfte Maschinenschwingung registrierbar ist.

Im Verfahrensschritt S130 wird daraufhin überprüft, ob der derart ermittelte Verstärkungsfaktor  $kV_{\max3}$  größer als der bis zu diesem Zeitpunkt maximale Verstärkungsfaktor  $kV_{\max2}$  ist.

5

Sofern der Verstärkungsfaktor  $kV_{\max3}$  größer als der bislang maximale Verstärkungsfaktor  $kV_{\max2}$  ist, wird der Verstärkungsfaktor  $kV_{\max3} = kV_{\max2}$  gesetzt und es erfolgt über ein nochmaliges Durchlaufen der Verfahrensschritte ab Schritt S100. Das heißt, es wird letztlich überprüft, ob  
10 mit einem veränderten Wert für  $T1\_OPT$  möglicherweise ein höherer Wert für den Verstärkungsfaktor  $kV$  eingestellt werden kann.

Dies erfolgt solange, bis im Verfahrensschritt S130 festgestellt wird, dass der Verstärkungsfaktor  $kV_{\max3}$  nicht mehr größer als im vorherigen Durchlauf  
15 ermittelte Verstärkungsfaktor  $kV_{\max2}$  ist.

Der dann vorliegende Wert für die erste Zeitkonstante  $T1$  wird gemäß Verfahrensschritt S140 als optimierter Wert  $T1\_OPT$  neben dem bereits vorher bestimmten Wert  $T2\_OPT$  zur Parametrierung des Referenzmodelles  
20 2. Ordnung verwendet.

Ferner wird ähnlich zum Vorgehen in Fig. 2a der zuletzt ermittelte maximale Verstärkungsfaktor  $kV_{\max2}$  mit einem Korrekturfaktor  $K < 1$  multipliziert, um wiederum die Stabilität des Lagereglers sicherzustellen, d.h. der optimierte  
25 Wert  $kV\_OPT$  für den Verstärkungsfaktor des Lagereglers ergibt sich wiederum zu

$$kV\_OPT = K * kV_{\max2} \quad \text{Gl. (5)}$$

30 Neben den beiden ermittelten Parametern  $T1$  und  $T2$  für das einzusetzende Referenzmodell 2. Ordnung liegt somit nunmehr auch ein optimierter, maximaler Verstärkungsfaktor  $kV\_OPT$  für den Lageregler vor, der im nachfolgenden Regelungsbetrieb einsetzbar ist.

Selbstverständlich existieren im Rahmen der vorliegenden Erfindung auch alternative Ausführungsformen.

- Im nachfolgenden ANHANG werden anschließend die der vorliegenden
- 5 Erfindung zugrundeliegenden theoretischen Überlegungen näher erläutert sowie verschiedene Simulations- und Versuchsergebnisse präsentiert.

## ANHANG

(THEORIE, SIMULATION UND VERSUCHSERGEBNISSE)

### 1. Simulation mit vereinfachtem Reglermodell

5

#### 1.1 Modell der Regelstrecke

Es wurde das erfindungsgemässe Verfahren und die erfindungsgemässe Anordnung anhand einer mathematischen Simulation getestet. Diese Simulation, die neben dem mathematischen Maschinenmodell auch das mathematische Modell der Erfindung beinhaltet wird im folgenden beschrieben.

Das Massenträgheitsmoment der Regelstrecke ist zusammen mit der Momentenkonstante des Motors die bestimmende Kenngrösse des Systems. Dabei werden folgende Parameter verwendet:

Massenträgheit  $J_I = 50 \text{ kgcm}^2$

20 Motorkonstante  $k_{MC} = \frac{1.5 \text{ Nm}}{\sqrt{2} A_{eff}}$

Somit ist die Regelstrecke  $G(s)$  bestimmt durch:

$$G(s) = \frac{\text{num}}{\text{den}} = \frac{1}{J * s}$$

25 Die Umrechnung von Kreisfrequenz  $\omega$  nach U/s erfolgt durch ein nachgeschaltetes P-Glied mit  $1 / (2 * \Pi)$ . Über den Eingang "Störmoment Ms" kann eine Störung eingespeist werden, die gleichzeitig auf die Momentengrösse und die Istdrehzahl wirkt. Dies soll einer typischen Störung

durch Fräser-Eingriff entsprechen und dient der Beurteilung der Störsteifigkeit.

- Um realistische drehzahlabhängige Verluste zu simulieren, erfolgt noch eine Rückführung  $k'_p$  des internen Streckenausganges auf den Momenten-Summierungspunkt. Dadurch entsteht eine neue Regelstrecke  $G'(s)$ .

$$G'(s) = \frac{\frac{1}{J * s}}{1 + k'_p * \frac{1}{J * s}}$$

$$G'(s) = \frac{1}{k'_p + J * s}$$

$$G'(s) = \frac{1}{k'_p} * \frac{1}{1 + \frac{J}{k'_p} * s}$$

Durch diese Rückführung entsteht ein TP1-Regler.

- In Figur 3 ist ein Modell der Regelstrecke 1. Ordnung mit Störeinspeisung dargestellt.

### 1.2 Modell der gestörten Regelstrecke

- Ein Modell der gestörten Regelstrecke ist in Figur 4 in schematischer Form dargestellt. Die Regelstrecke wird mit einem Störpuls von 2 Nm und einer Dauer von 70 ms beaufschlagt. Der Startzeitpunkt liegt bei 40 ms.

- Diese gestörte Regelstrecke wird als Gruppe "Gestörte Regelstrecke A -> U/s" in eine Simulation eingebunden.

### 1.3 Simulationsmodell

- Das Simulationsmodell enthält eine geschlossene Lageregler Schleife. Zu Abgleichzwecken des Drehzahlreglers kann über Switch 1 ein Sprung von 200 mm/min auf den Drehzahlregler gegeben werden. Ein geeignetes Simulationsmodell für die Untersuchung eines Referenzmodelles 1. Ordnung

ist in Figur 5 dargestellt. Mit dem Schalter vor Sum1 kann das IPC-Referenzmodell ein- und ausgeschaltet werden.

## 5    2. Bestimmung der Simulationsparameter

Für die Parametrierung der Regler mußten die Reglerverstärkungen ermittelt werden.

### 2.1 Abgleich des Drehzahlreglers

10

Zum Abgleich des Drehzahlreglers wurde das Störmoment der Regelstrecke vorübergehend auf 0 gesetzt und Switch 1 auf Sprung eingestellt. Die Sprunghöhe betrug 200 mm/min.

15    Für die Verstärkungsfaktoren für

P-Faktor (Drehzahlregler)	= 9
I-Faktor (Drehzahlregler)	= 2200

des Reglers ergab sich Verhältnisse wie in Figur 6 gezeigt.

Die Simulationsergebnisse entsprechen einem realen Antrieb. Die  
20    Anregelzeit wurde mit  $T_a = 4,6 \text{ ms}$  bestimmt.

### 2.2 Bestimmung der Lagereglerverstärkung kV

Um die maximale Lagereglerverstärkung zu bestimmen, wurde der I-Anteil  
25    des Drehzahlreglers auf 0 gesetzt.

Lagereglerverstärkung	= 15
P-Faktor (Drehzahlregler)	= 9
I-Faktor (Drehzahlregler)	= 0

Der kV-Faktor wurde so eingestellt, daß am Motor-Sollstrom  $I_q$  keine Schwingung auftrat.

An der Schleppfehler-Kurve in Figur 7 ist die geringe Störsteifigkeit ohne I-Anteil zu erkennen. Es findet keine vollständige Ausregelung der Störung statt.

5

### 2.3 Aktivieren des I-Anteils des Drehzahlreglers

Es wurde der I-Anteil des Drehzahlreglers aktiviert, ohne daß die Lagereglerversärkung reduziert wurde

10

Lagereglerversärkung	= 15
P-Faktor (Drehzahlregler)	= 9
I-Faktor (Drehzahlregler)	= 2200

An den Motorströmen ist gemäß Figur 8 leicht zu erkennen, daß das System schwingt. Der kV-Faktor (oder der I-Anteil des Drehzahlreglers) muß reduziert werden.

15

### 2.4 Reduzierung der Lagereglerversärkung

Es wurde der kV-Faktor des Lagereglers reduziert, bis keine Schwingneigung mehr auftrat.

20

Lagereglerversärkung	= 9
P-Faktor (Drehzahlregler)	= 9
I-Faktor (Drehzahlregler)	= 2200

Durch den geringeren kV-Faktor steigt der Schleppfehler (schlechtes Führungsverhalten), allerdings ist gegenüber einem System ohne I-Anteil die Störsteifigkeit verbessert (siehe Figur 9).

25



## 2.5 Vorschalten des IPC-Referenzmodells (1. Ordnung) vor den I-Anteil

- Es wurde der kV-Faktor eingestellt, der anfangs ohne I-Anteil des Drehzahlreglers möglich war. Zusätzlich wurde der I-Anteil des abgeglichenen Drehzahlreglers eingestellt. Das Referenzmodell wurde 1. Ordnung realisiert (Vernachlässigung der Verlustrückführung der Regelstrecke).

10

Lagereglerverstärkung	MP1510 [m/min/mm]	= 15
P-Faktor (Drehzahlregler)	MP2500 [As]	= 9
I-Faktor (Drehzahlregler)	MP2510 [A]	= 2200

Aus dem Diagramm in Figur 10 kann abgelesen werden, daß bei geringem Schleppfehler eine hohe Störsteifigkeit gegeben ist.

15

## 3. Berechnung des IPC-Referenzmodells

- Grundlage für das Referenzmodell ist, daß alle Anteile des P-Reglers incl. Strecke nicht an den Integrator gelangen. Deshalb wird ein vereinfachtes Modell der geschlossenen Reglerschleife (nur P-Regler aktiv) in die Sollvorgabe des Integrators eingefügt. Die Motorverluste werden nicht berücksichtigt.

25

### 3.1 Berechnung aus Modellparametern

Folgende physikalische Größen tauchen in dieser geschlossenen Reglerschleife auf:

- P-Faktor Drehzahlregler: in [As/U]  
 Motorkonstante:  $k_{MC} / \sqrt{2}$  in [Nm/A]  
 Massenträgheitsmoment der Strecke  $J_I$

30

Die Übertragungsfunktion  $G(s)$  des offenen Regelkreises lautet somit:

$$G(s) = MP2500 * k_{MC} * \frac{1}{2 * \pi} * \frac{1}{J_I * s}$$

$$k'_p = MP2500 * k_{MC} * \frac{1}{2 * \pi}$$

$$G(s) = k'_p * \frac{1}{J_I * s}$$

5

Die Übertragungsfunktion  $H(s)$  des geschlossenen Regelkreises lautet:

$$H(s) = \frac{G(s)}{1 + G(s)}$$

$$H(s) = \frac{\frac{k'_p}{J_I * s}}{1 + \frac{k'_p}{J_I * s}}$$

$$H(s) = \frac{1}{1 + \frac{J_I}{K'_p} * s}$$

$$H(s) = \frac{1}{1 + T_1 * s}$$

- 10 Man erhält als IPC-Referenzmodell ein PT1-Glied mit der Zeitkonstante  $T_1$ :

$$T_1 = \frac{J_I}{k'_p} = \frac{J_I * 2 * \pi}{MP2500 * k_{MC}} \quad (F1)$$

### 3.2 Berechnung aus Maschinenparametern

15

Heidenhain-Steuerungen weisen eine über einen Maschinenparameter einstellbare Beschleunigungsvorsteuerung auf. Dieser Maschinenparameter MP26 gibt den Kehrwert der Winkelbeschleunigung  $\alpha$  pro Strom in [As<sup>2</sup>/U]

an. Über die Winkelbeschleunigung kann auf einfache Weise die Zeitkonstante des IPCs berechnet werden.

$M_{el}$  = elektrisches Moment [Nm]

5  $k_{MC}$  = Motor-Momentenkonstante [Nm/A]

$J_I$  = Massenträgheitsmoment [kg.m<sup>2</sup>]

MP26 = Beschleunigungsvorsteuerung [As<sup>2</sup>/U]

$$M_{el} = I_{MOT} * k_{MC}$$

$$\alpha = \frac{M_{el}}{J_I}$$

$$\alpha = \frac{I_{MOT} * 2 * \pi}{MP26}$$

10 Gleichgesetzt ergibt sich:

$$\frac{J_I}{k_{MC}} = \frac{MP26}{2 * \pi}$$

Dieses in (F1) eingesetzt:

$$T_1 = \frac{J_I}{k_p} = \frac{J_I * 2 * \pi}{MP25 * k_{MC}}$$

15

$$\boxed{T_1 = \frac{MP26}{MP25}} \quad (F2)$$

Obwohl der IPC zum Integralfaktor des Drehzahlreglers zuzuordnen ist, sollte der IPC-MP bei den Vorsteuerparametern liegen, da er erst eingesetzt werden kann, wenn MP26 ermittelt wurde.

20

#### 4. Untersuchung des Phasenganges der Drehzahlreglerschleife

25 Für die Untersuchung des Phasenganges wird die Phasenverschiebung des geschlossenen Drehzahlregelkreises untersucht. Dazu wurde ein

Simulationsmodell, das u.a. die Soll- und Istgeschwindigkeit beinhaltet benutzt. Dabei wurden folgende Phasengänge bestimmt.

#### 4.1 Phasengang ohne IPC

5

In Figur 11 ist der Phasengang ohne IPC dargestellt. Man erkennt, daß sich erst bei  $-180^\circ$  eine Grenze in der Phase ergibt. Zusammen mit zusätzlichen Verzögerungen, Totzeiten und großen Massen bei realen Systemen ergibt sich eine Reduzierung des Phasenrands durch den I-Anteil des

10

#### 4.2 Phasengang mit IPC

In Figur 12 ist der Phasengang mit IPC dargestellt. Die Phase wird mit IPC nur um max.  $-90^\circ$  verschoben. Durch die Erhöhung des Phasenrandes ergibt sich eine bessere Stabilität (bzw. höherer kV) des Lagereglers.

15

### 5. Berücksichtigung des IPCs in der Vorsteuerung

20

Alle vorausgehenden Betrachtungen fanden ohne Vorsteuerungen (geschleppte Betriebsart) statt. Im folgenden wird die Vorsteuerung mit einbezogen.

25

Im Simulationsmodell wurde dazu aus Gründen der Übersicht der Drehzahlregler in einem eigenen Block realisiert und mit folgenden Eingängen (von oben nach unten) ausgestattet:

Ein-/Ausschalten des IPCs

30

Ein-/Ausschalten der Vorsteuerung

Beschleunigungsvorsteuerung aus Interpolator (IPO)

Geschwindigkeitsvorsteuerung aus IPO

Solldrehzahl

Istdrehzahl

Der Drehzahlreglerblock besitzt folgende Ausgänge:

Drei Signale (über Multiplexer) zum Beobachten der Ströme im Drehzahlregler

- 5 Momentenstromausgang  $I_q$  des Drehzahlreglers

In Figur 13 ist die Struktur der Lageregler-Simulation mit Vorsteuerung dargestellt. In den Lageregelkreis wurde noch die Geschwindigkeitsvorsteuerung (Sum6) integriert.

10

Durch Verbinden des Störmoments mit dem entsprechenden Eingang der Regelstrecke kann wie bisher eine Störung auf die Regelstrecke wirken.

Die Streckenvorgabe kommt aus dem Interpolatorblock (IPO). Über die  
15 Matlab-Datei "M\_IPO.M" kann eine Parametrierung von Ruck, Beschleunigung, Geschwindigkeit und Strecke vorgenommen werden. "M\_IPO.M" wird auch innerhalb von "M\_IPC.M" aufgerufen.

### 5.1 Schleppfehlersimulationen

20

Im Folgenden werden die verschiedenen Vorsteuerungen nacheinander zugeschaltet. Um die Wirkung zu vergleichen, wurden alle Simulationsparameter konstant gehalten.

- 25 Streckenparameter:

Momentenkonstante	$K_{tc}$ [Nm/A]	$= 1.5 * \text{sqrt}(2)$
Last-Trägheitsmoment	$J_l$ [kg.m <sup>2</sup> ]	$= 9$
Drehzahl-Verluste	[Nm/ω]	$= 0.15$

Regelkreisparameter:

Lagereglerverstärkung	MP1510 [m/min/mm]	$= 9$
P-Faktor (Drehzahlregler)	MP2500 [As]	$= 9$
I-Faktor (Drehzahlregler)	MP2510 [A]	$= 2200$

Interpolationsparameter:

Ruck	$r \text{ [m/s}^3]$	$= 2 \cdot 10^3$
Beschleunigung	$a \text{ [m/s}^2]$	$= 5$
Geschwindigkeit	$v \text{ [m/s]}$	$= 0.4 / 60$
Lage	$s \text{ [m]}$	$= 4 \cdot 10^{-4}$

### 5 5.1.1 Schleppfehler ohne Vorsteuerung

In Figur 14 ist der resultierende Schleppfehler ohne Vorsteuerungen veranschaulicht. Es ergibt sich ein maximaler Schleppfehler von ca. 45  $\mu\text{m}$ , der unzulässig hoch ist.

### 5.1.2 Schleppfehler mit Geschwindigkeitsvorsteuerung

In Figur 15 ist der resultierende Schleppfehler ohne Vorsteuerungen dargestellt. Es ergibt sich ein max. Schleppfehler während der Beschleunigungsphase von 10  $\mu\text{m}$ .

### 5.1.3 Schleppfehler mit Beschleunigungsvorsteuerung

In Figur 16 ist der resultierende Schleppfehler mit Beschleunigungsvorsteuerung veranschaulicht. Ein Schleppfehler ist nicht wie erkennbar mehr nachweisbar.

### 5.1.4 Schleppfehler mit IPC (ohne IPC-Vorsteuerung)

In Figur 17 ist der resultierende Schleppfehler mit Vorsteuerung und IPC (ohne IPC-Vorsteuerung) veranschaulicht. Wie erkennbar baut sich am Ende der Beschleunigungsphase ein Schleppfehler von 13  $\mu\text{m}$  auf.

## 5.2 Einbau einer IPC-Vorsteuerung in den Drehzahlregler

Um den Schleppfehler während der Beschleunigungsphase zu reduzieren, muß eine Beschleunigungsvorsteuerung implementiert werden. Da die Eingangsgröße des IPCs eine Geschwindigkeit ist, ist eine Multiplikation der Beschleunigungsvorsteuergröße  $a_{\text{soll}}(\text{ipo})$  mit der IPC-Zeitkonstante  $T_1$  nötig.

Um eine rechenzeitoptimierte Implementation zu ermöglichen, wurde der Vorsteuer-Summierungspunkt vom Reglerausgang zum IPC-Eingang vorverlegt. dabei ergibt sich die in Figur 18 dargestellte Struktur, d.h. die IPC mit Beschleunigungsvorsteuerung.

Eine weitere Verbesserung des Schleppfehlers kann durch eine Rück-Vorsteuerung erreicht werden. Die Vorsteuergröße " $r_{\text{soll}}(\text{ipo})$ " kann durch einfaches Differenzieren von " $a_{\text{soll}}(\text{ipo})$ " im Drehzahlregler gebildet

werden. Der dabei entstehende zeitliche Fehler von einer halben Abtastzeit spielt nur eine untergeordnete Rolle.

5 In Figur 19 ist die IPC mit Beschleunigungs- und Ruck-Vorsteuerung dargestellt.

### 5.2.1 Schleppfehler mit konv. Vorsteuerung, IPC und IPC-Vorsteuerung

10 In der Simulation wurden die relevanten Vorsteuerungen um obige Struktur erweitert und mit einer Struktur verglichen, bei welcher der Vorsteuerpunkt am Reglerausgang liegt. Dabei ergaben sich keine Unterschiede.

15 In Figur 20 ist der resultierende Schleppfehler mit konventioneller Vorsteuerung, IPC und IPC-Vorsteuerung veranschaulicht.

Wird der IPC-Vorsteuerzweig eingebaut, ergibt sich wiederum kein nachweisbarer Schleppfehler.

20 In Figur 21 ist die Struktur des Drehzahlregler-Blocks mit Vorsteuerung im Reglerausgang veranschaulicht.

## 6. Praktische Untersuchung des IPCs

25 Die praktischen Untersuchungen wurden an einer DIGMA 700 durchgeführt. Zuerst wurde ein IPC 1. Ordnung, wie er in obiger Simulation eingesetzt wurde, in die DSP-Software implementiert. Dabei ergaben sich nur geringe Vorteile bei Einsatz des IPCs, der Lageregler-kv konnte nur um ca. 15 % erhöht werden.

30

Es musste daher ein IPC mit höherer Ordnung eingesetzt werden, der den realen Streckenverhältnissen besser entspricht.

### 6.1 Einsatz eines IPCs 2. Ordnung



Eine Realisierung des IPCs mit 2. Ordnung wurde nach folgender Übertragungsfunktion eingesetzt:

$$H(s) = \frac{1}{1 + T_1 * s + T_2 * s^2}$$

Dies ist die Übertragungsfunktion eines schwingfähigen PT2s mit Dämpfung D.

$$D = \frac{\alpha}{\beta} = \frac{T_1}{2 * T_2}$$

Bei realen Werkzeugmaschinen ist eine gedämpfte Schwingung zu erwarten. Die Dämpfung D bewegt sich somit im Bereich  $0 < D < 1$ .

Die Zeitkonstante T2 berechnet sich:

$$T_2 = \frac{T_1}{2 * D}$$

Bei Einsatz eines IPCs 2. Ordnung wurden bereits deutlich bessere Ergebnisse erzielt, diese kamen aber immer noch nicht an die Simulationsergebnisse heran, die auf eine theoretische Erhöhung der Lagereglerverstärkung kv auf ca. 170% schließen ließen. Dabei wurden für die DIGMA 700 folgende Zeitkonstanten ermittelt:

Zeitkonstanten an der DIGMA 700:

	X-Achse	Y-Achse	Z-Achse
MP25	15	15	12
MP26	0.0212	0.0205	0.0165
T1'	1	1	1

T2'	0.0017	0.0018	0.0018
T1	1.41 ms	1.37 ms	1.37 ms
T2	1.7 ms	1.8 ms	1.8 ms
D	0.41	0.39	0.38

Untenstehende Tabelle zeigt die erreichten Lagereglerverstärkungen (kV-Faktoren) an der X-Achse der DIGMA 700 bei verschiedenen IPC-Ausführungen. Dabei wurde immer die Schwinggrenze gesucht. Für einen stabilen Betrieb ist diese nach einer Faustregel mit Faktor 0.65 zu multiplizieren.

	kV (Schwing- grenze)	kV (stabil)
ohne IPC	8.5	5.5
IPC 1. Ordnung	9.5	6.2
IPC 2. Ordnung (D = 0.5)	13.0	8.5
IPC 2. Ordnung (D = 0.41)	14.5	9.5

Die Lagereglerverstärkung konnte somit auf 170% erhöht werden.

10

## 6.2 Herleitung des IPC-Algorithmus

Die Herleitung des IPC-Algorithmus erfolgt ausgehend von der Gleichung:

$$H(s) = 1 / (1 + T1 \cdot s + T2^2 \cdot s^2)$$

15

### Bestimmung der T2-Zeitkonstante

Versuche an der DIGMA 700 haben gezeigt, daß die T2-Zeitkonstante und somit die Dämpfung dann optimal eingestellt war, wenn der Schleppfehler in der Ruck-Phase minimale Abweichung zeigte (mit integrierter Ruck-

20

Vorsteuerung). Bei allen drei Achsen konnte auf diese Art die T2-Zeitkonstante bestimmt werden.

Am Laboraufbau konnte (JL direkt auf Motorwelle) konnte ebenfalls auf  
5 diese Art eine Bestimmung der optimalen T2-Zeitkonstante durchgeführt werden.

Zusammenhang zwischen Dämpfung und T2-Zeitkonstante:

$$D = \frac{T_1}{2 * T_2}$$

10

### 6.3 Einsatz an Maschinen mit dominanter Eigenfrequenz

Eine weitere Einsatzmöglichkeit des IPCs ist gegeben, wenn man für  
15 Maschinen mit tiefer Eigenresonanz und schlechter Dämpfung die IPC-Zeitkonstanten auf die Regelstrecke abstimmt.

Bei ersten Untersuchungen an der "Chiron FZ 22 L" in der Fertigung konnte dabei der kV-Faktor von 1 auf 5 erhöht werden. Allerdings konnte in diesem  
20 Fall nicht die aus MP26 und MP25 ermittelte Zeitkonstante T1 eingesetzt werden. Es mußte eine wesentlich höhere Zeitkonstante (ca. Faktor 5) eingesetzt werden, welche eine Zeitkonstante in der Maschine kompensiert.

Zusätzlich zur "Chiron FZ 22 L" wurde noch eine zweite Maschine, eine  
25 Deckel-Maho "DMU 50 V" untersucht.

Die Maschine Deckel-Maho "DMU 50 V" weist starke Resonanzen bei 42 Hz und 50 Hz auf. Diese sind so dominant, daß nur ein Ruck von 10 und eine Beschleunigung von 1.5 bei kV = 4 eingestellt werden kann. Durch Einsatz  
30 des IPCs konnte für alle Achsen ein kV von 12 erreicht werden. Die Werte für Ruck konnten auf 20 erhöht werden, die Beschleunigung wurde auf 3 angehoben.

Zeitkonstanten an der DMU 50 V:

	X-Achse	Y-Achse	Z-Achse
MP25	15	4.8	5.4
MP26	0.045	0.016	0.016
T1'	0.0042	0.0052	0.0052
T2'	0.003	0.0022	0.0013
T1	4.2 ms	5.2 ms	5.2 ms
T2	3.0 ms	2.2 ms	1.3 ms
D	0.70	1.18	2.00

Die Drehzahlreglereinstellungen wurden nicht verändert (org. Deckel-Maho).

5

Fazit: Bei beiden Maschinen konnte eine deutliche Verbesserung im Lagereglerverhalten durch Einsatz des IPCs erreicht werden.

## 10 7. IPC-Abgleich

Bei Einsatz des IPCs muß man zwischen zwei Maschinentypen unterscheiden. Typ 1 ist eine steife Maschine nicht zu großer Bauart, die meist direkt angetrieben ist oder Linearmotoren besitzt. Typ 2 ist eine Maschine mit dominanter Eigenfrequenz im Bereich 15 Hz .. 80 Hz, an der kein ausreichend großer kV-Faktor eingestellt werden kann.

15

### 7.1 Abgleich an steifen Maschinen

Bei Maschinen vom Typ 1 reicht es in der Regel, wenn der IPC mit  $T1' = 1$  und  $T2' = 0$  eingeschaltet wird. Der kV-Faktor wird so lange erhöht, bis eine deutliche Schwingneigung beim Verfahren zu beobachten ist.

20

Wenn dieser kV-Faktor gefunden wurde, erfolgt ein Feinabgleich der IPC-Zeitkonstante T2. Dazu wird zuerst ein T2-Startwert von

25

$$T2 = \frac{2}{3} * \frac{MP26}{MP25}$$

eingestellt. Anschließend wird T2' solange verändert, bis ein neuer maximaler kV-Faktor gefunden ist. Üblicherweise muß bei diesem  
5 Maschinentyp die T2-Zeitkonstante reduziert werden (bis max. 0.5 x Startwert). Es ist aber auch eine Erhöhung gegenüber dem Startwert denkbar.

Zum Abschluß ist der kV-Faktor für die Schwinggrenze mit Faktor 0.65 zu  
10 multiplizieren, um eine ausreichende Stabilität des Lagereglers sicherzustellen.

Bei diesem Maschinentyp ist eine Erhöhung des kV's um Faktor 1.4 .. 1.7 möglich.

15

## 7.2 Abgleich an Maschinen mit dominanter Eigenfrequenz

Bei Maschinen vom Typ 2 ist zunächst der gleiche Abgleich durchzuführen wie bei Maschinen vom Typ 1. Der IPC muß mit T1' = 1 eingeschaltet  
20 werden und es gilt, T2 zu ermitteln. Hierbei ist auch möglich, daß sich eine T2-Zeitkonstante ergibt, welche deutlich größer als der T2-Startwert ist.

Nun muß die T1-Zeitkonstante ermittelt werden. Dazu ist anstelle der 1 ein T1-Startwert in MP2602 einzutragen. Dieser errechnet sich aus

25

$$T1 = \frac{MP26}{MP25}$$

Dieser Startwert ist solange zu erhöhen, bis ein maximaler kV-Faktor gefunden ist. Ist die gefundene T1-Zeitkonstante deutlich größer als der  
30 Startwert (> Faktor 2), sollte erneut ein Abgleich der T2-Zeitkonstante erfolgen. Dazu ist der bisher gefundene Wert versuchsweise zu erniedrigen bzw. zu erhöhen.

Zum Abschluß ist der kV-Faktor für die Schwinggrenze mit Faktor 0.65 zu multiplizieren, um eine ausreichende Stabilität des Lagereglers sicherzustellen.

5

Bei Maschinen vom Typ 2 ist auch eine größere Steigerung des kV's als Faktor 1.7 möglich.

10

15

## Ansprüche

=====

1. Verfahren zur Ermittlung von mindestens einer Zeitkonstanten eines Referenzmodelles, ausgebildet als Verzögerungsglied 2. Ordnung, das in einer kaskadierten Regelungsanordnung einer Maschine zwischen einem Lageregler mit einem Verstärkungsfaktor und einem  
5 Drehzahlregler angeordnet ist, der einen Proportionalzweig und einen Integralzweig umfasst und wobei das Referenzmodell zumindest im wesentlichen das Verhalten des geschlossenen Drehzahlregelkreises ohne Berücksichtigung des Integralanteiles nachbildet,  
10 dadurch gekennzeichnet,  
  
dass ein optimierter Wert ( $T2\_OPT$ ) einer Zeitkonstanten ( $T2$ ) des Referenzmodelles in Abhängigkeit einer erfassten Schwingungsfrequenz ( $f_{s1}$ ,  $f_{s2}$ ) einer ungedämpften  
15 Maschinenschwingung ermittelt wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass
  - Startwerte  $T1\_0$ ,  $T2\_0$  für die zwei Zeitkonstanten ( $T1$ ,  $T2$ ) des Referenzmodelles vorgegeben werden,
  - 20 - anschließend der Verstärkungsfaktor ( $kV$ ) des Lagereglers schrittweise bis zu einem ersten maximalen Verstärkungsfaktor ( $kV_{max1}$ ) erhöht wird, bei dem eine ungedämpfte Maschinenschwingung registrierbar ist,
  - die Schwingungsfrequenz ( $f_{s1}$ ) der ungedämpften  
25 Maschinenschwingung erfasst wird,
  - der optimierte Wert einer Zeitkonstanten ( $T2\_OPT$ ) als Funktion der Schwingungsfrequenz ( $f_{s1}$ ) bestimmt wird.
3. Verfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass die  
30 Startwerte für die Zeitkonstanten ( $T1$ ,  $T2$ ) gemäß  $T1\_0 = 0$  und  $T2\_0 = 0$  vorgegeben werden.

4. Verfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass der optimierte Wert der zweiten Zeitkonstanten (T2\_OPT) gemäß der Beziehung

5

$$T2\_OPT = f(f_{S1}) = 1 / (2 * \pi * f_{S1})$$

bestimmt wird.

- 10 5. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die andere, erste Zeitkonstante (T1) des Referenzmodelles aus vorgegebenen System-Parametern bestimmt wird.

- 15 6. Verfahren nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass die andere, erste Zeitkonstante (T1) des Referenzmodelles gemäß der Beziehung

$$T1\_OPT = (J_L * 2 * \pi) / (k_P * K_{MC})$$

bestimmt wird, wobei

20

J<sub>L</sub>: Lastmoment,

k<sub>P</sub>: Verstärkungsfaktor des Proportionalzweiges des Drehzahlreglers,

K<sub>MC</sub>: Motorkonstante.

- 25 7. Verfahren nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass nachfolgend überprüft wird, ob die vorher ermittelten Zeitkonstanten (T1\_OPT, T2\_OPT) des Referenzmodelles das gewünschte Führungsverhalten der Regelungsanordnung gewährleisten.

- 30 8. Verfahren nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, dass hierzu unter Verwendung der optimierten Zeitkonstanten (T1\_OPT, T2\_OPT) der Verstärkungsfaktor (kV) solange erhöht wird, bis eine ungedämpfte Maschinenschwingung registrierbar ist und der zugehörige Verstärkungsfaktor als zweiter maximaler Verstärkungsfaktor (kV<sub>max2</sub>) im nachfolgenden Regelungsbetrieb verwendet wird.



9. Verfahren nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, dass der  
ermittelte zweite, maximale Verstärkungsfaktor ( $kV_{max2}$ ) zur  
Verwendung im Regelungsbetrieb mit einem Sicherheitsfaktor K  
multipliziert wird, wobei  $K < 1$ .
10. Verfahren nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass  
nachfolgend überprüft wird, ob die gewählte erste Zeitkonstante  
(T1\_OPT) ein akzeptables Systemverhalten liefert oder aber eine  
Optimierung der ersten Zeitkonstante (T1) vorgenommen werden muss.
11. Verfahren nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, dass im Fall  
einer erforderlichen Optimierung der ersten Zeitkonstante (T1)  
ausgehend von einem vorgegebenem Startwert (T1\_02) für die erste  
Zeitkonstante die erste Zeitkonstante (T1) solange schrittweise  
verändert wird, bis eine ungedämpfte Maschinenschwingung  
registrierbar ist und der daraus erhaltene Wert der ersten  
Zeitkonstanten (T1) als optimierter Wert (T1\_OPT) zur Parametrierung  
des Referenzmodelles verwendet wird.
12. Verfahren nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, dass unter  
Verwendung der optimierten zweiten Zeitkonstante (T2\_OPT) und der  
aktuellen ersten Zeitkonstante (T1) der Verstärkungsfaktor (kV) solange  
erhöht wird, bis eine ungedämpfte Maschinenschwingung registrierbar  
ist und der zugehörige Verstärkungsfaktor als zweiter maximaler  
Verstärkungsfaktor ( $kV_{max2}$ ) im nachfolgenden Regelungsbetrieb  
verwendet wird.
13. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch  
gekennzeichnet, dass das Verfahren automatisiert durchgeführt wird.
14. Verwendung eines Referenzmodelles, das nach einem der  
vorangehenden Ansprüche parametrisiert wurde, in einer kaskadierten  
Regelungsanordnung einer Maschine, wobei das Referenzmodell (40)

zwischen einem Lageregler (10) und einem Drehzahlregler (20) angeordnet ist.

- 5 15. Verwendung eines Referenzmodelles, das nach einem der vorangehenden Ansprüche parametrisiert wurde, in einer kaskadierten Regelungsanordnung einer Maschine, wobei das Referenzmodell (40) zwischen einem Lageregler (10) und einem Drehzahlregler (20) angeordnet ist und die Maschine theoretisch ein Referenzmodell n-ter Ordnung erfordern würde, wobei  $n > 2$  gilt.
- 10 16. Vorrichtung, dadurch gekennzeichnet, dass diese zur Durchführung eines Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 –15 geeignet ist.

FIG. 1

1/13

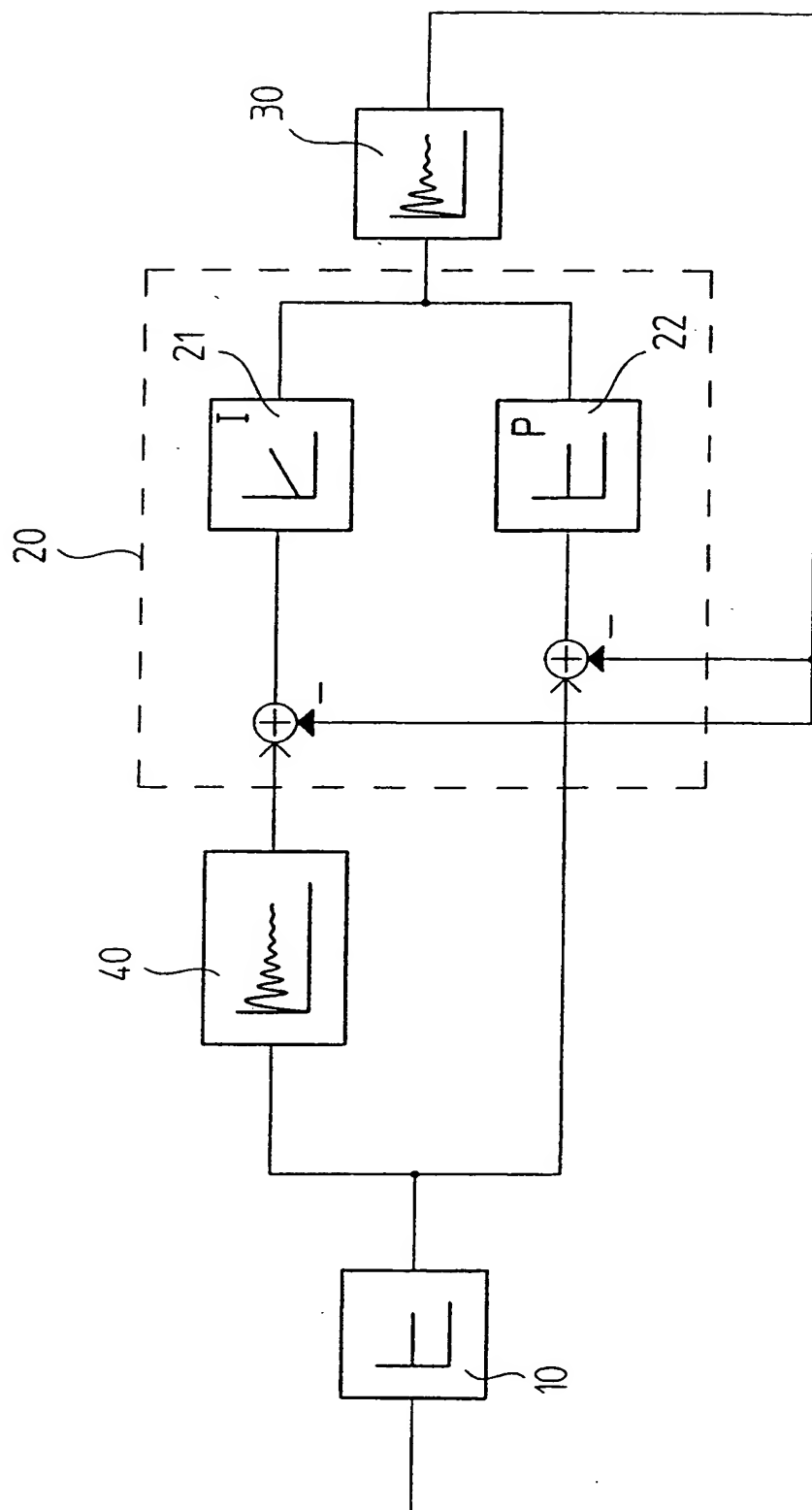




FIG. 2a

2/13

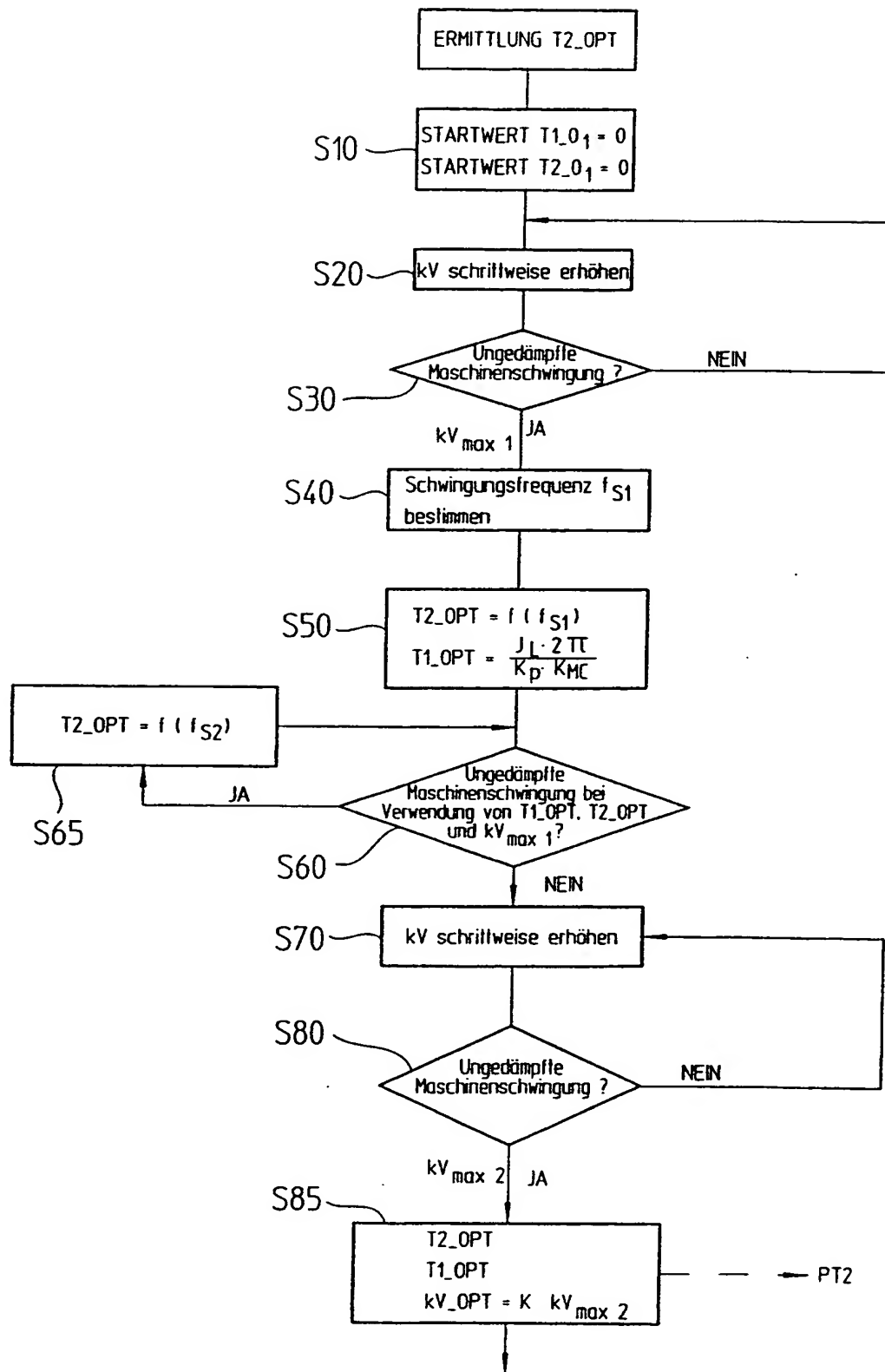


Fig. 2b



FIG. 2b

3/13

Fig. 2a

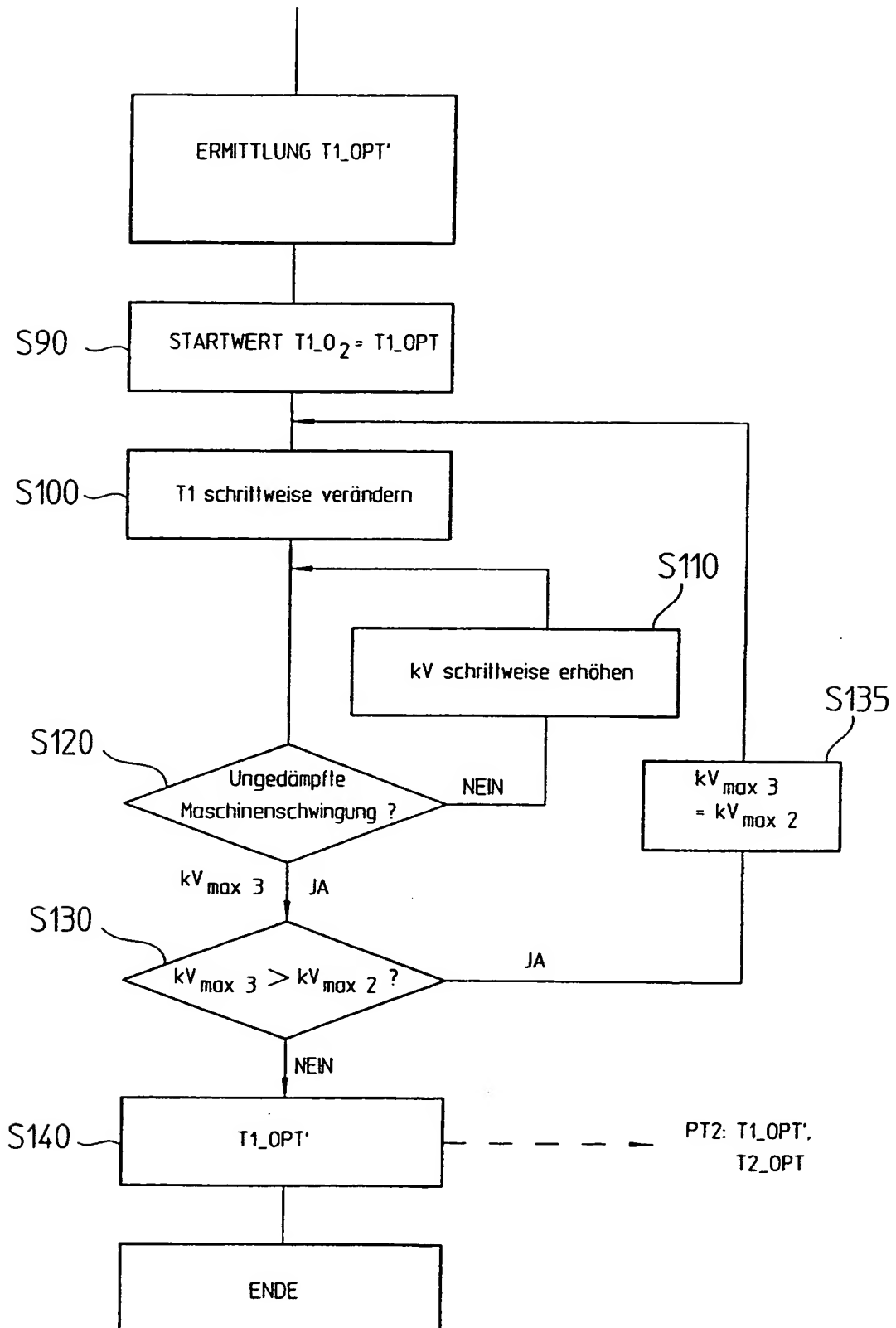






FIG. 3

4/13

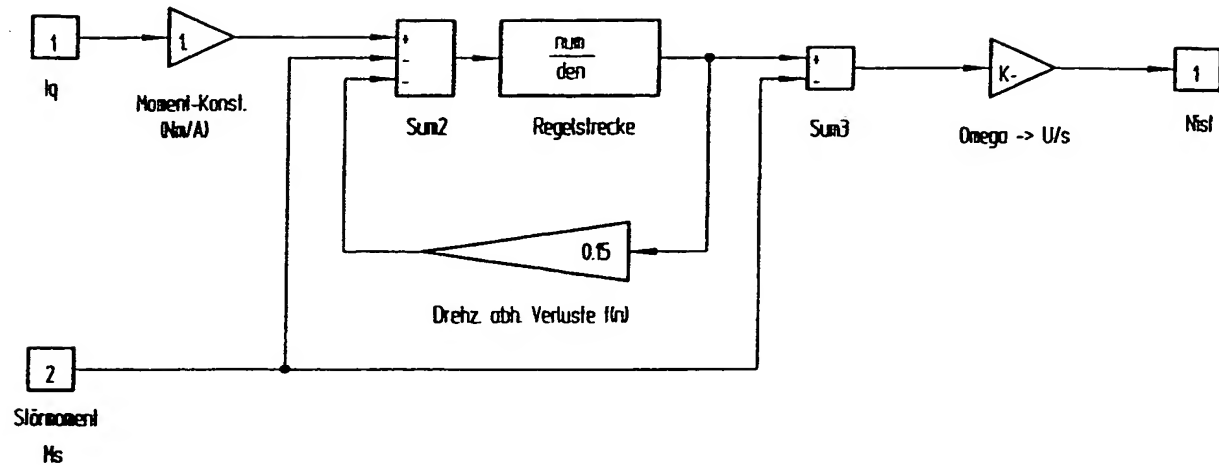


FIG. 4

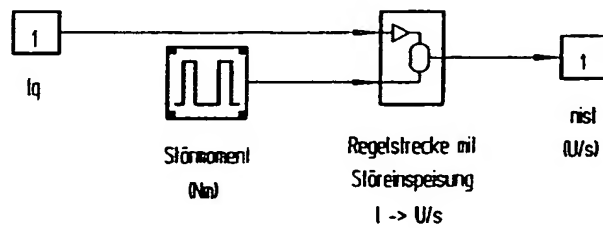
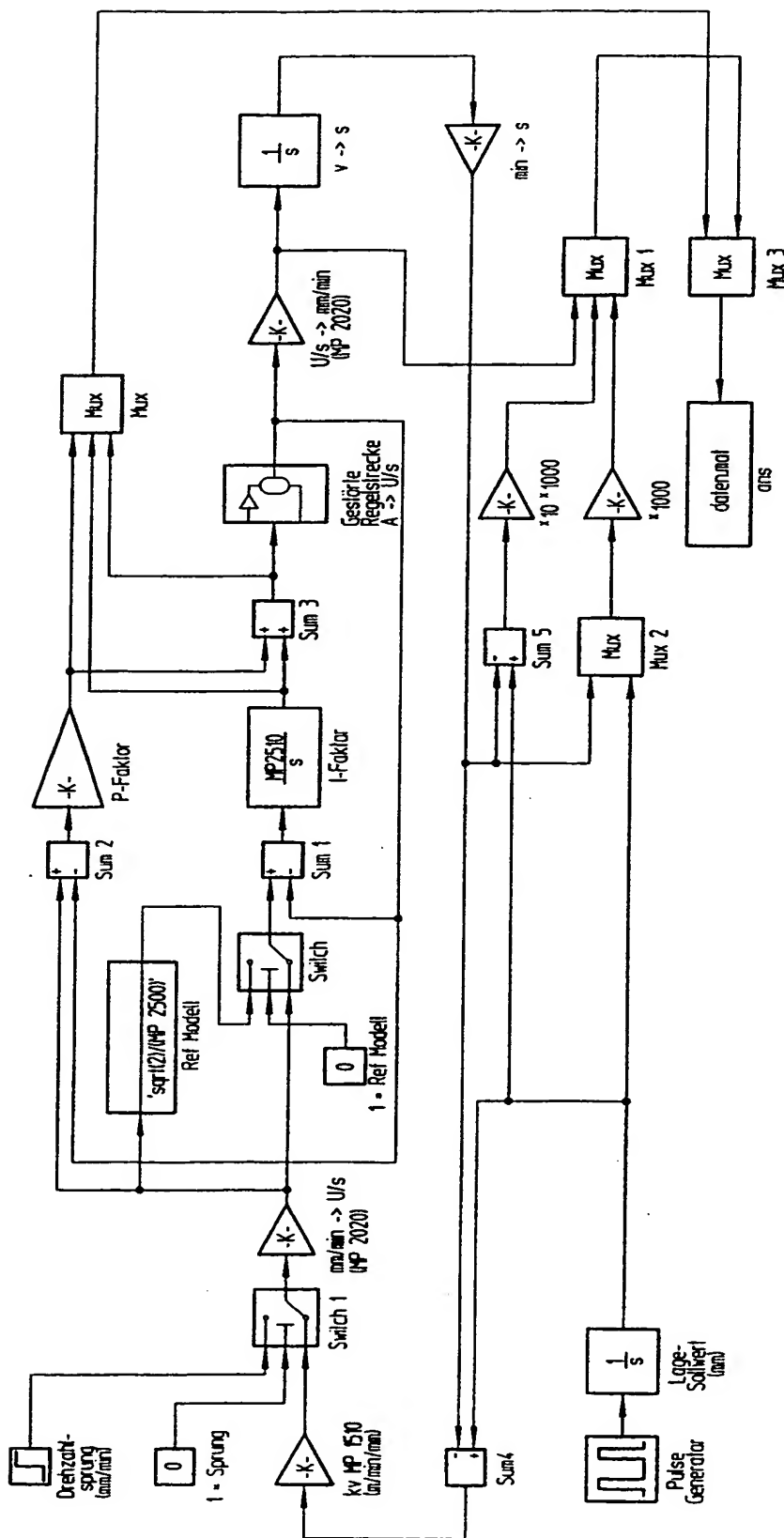




FIG. 5

5/13





6/13

Fig. 6

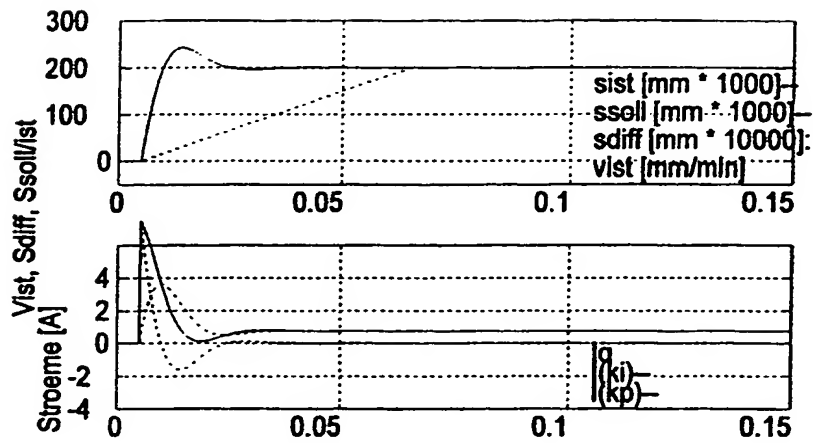
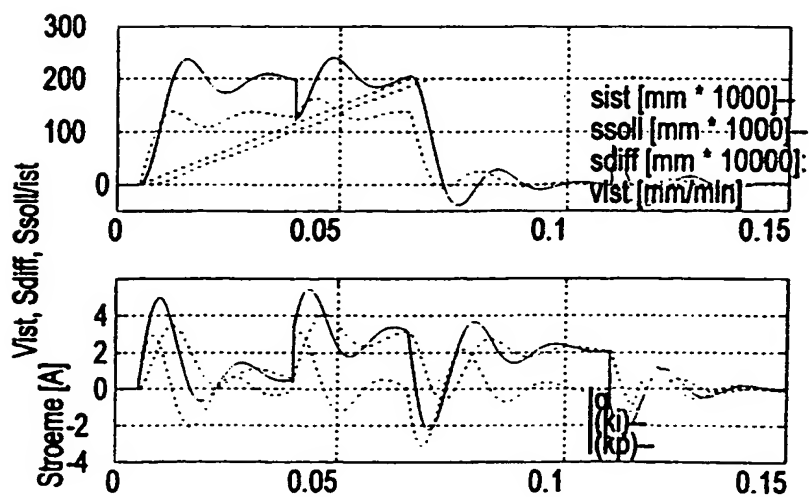


Fig. 7





7/13

Fig. 8

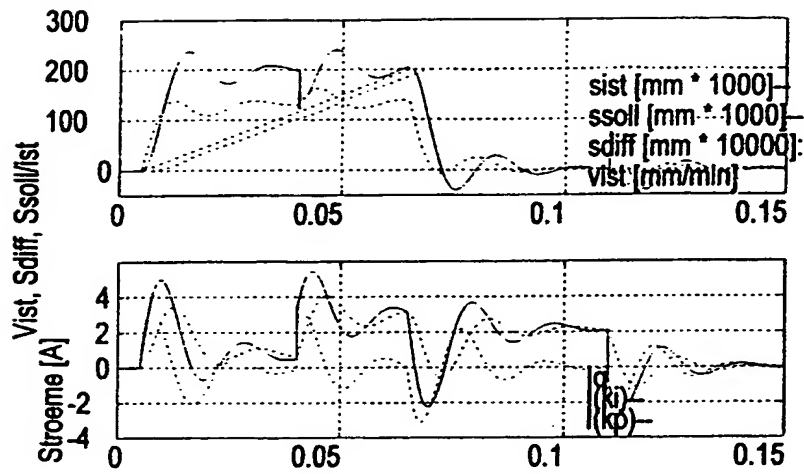
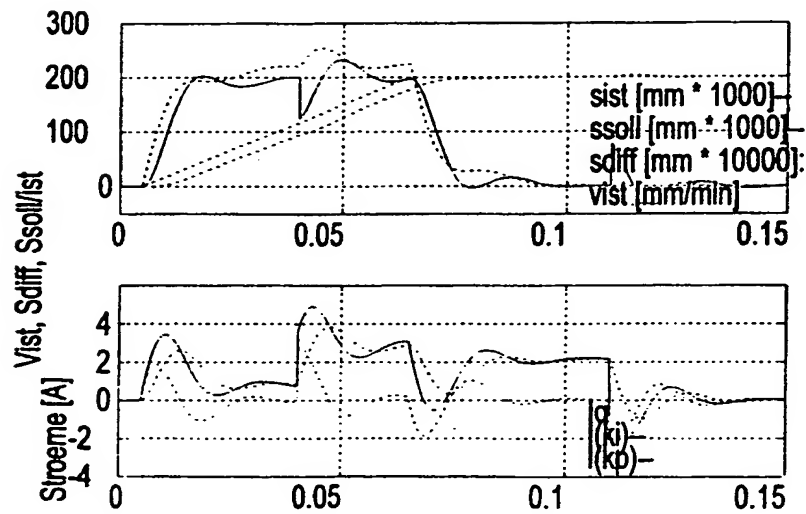


Fig. 9







8/13

Fig. 10

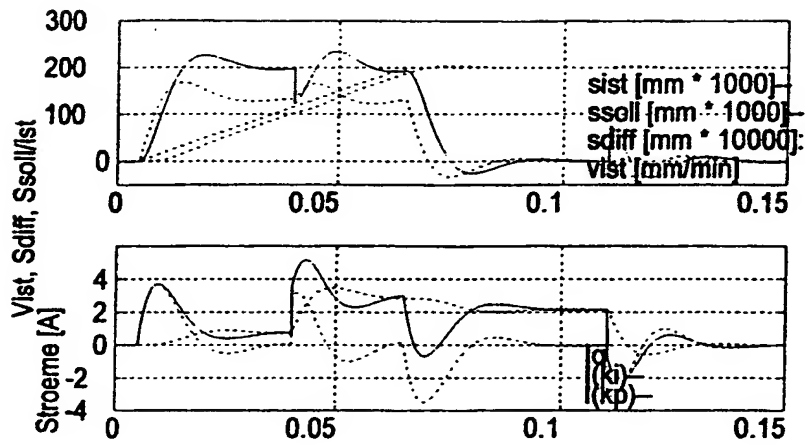
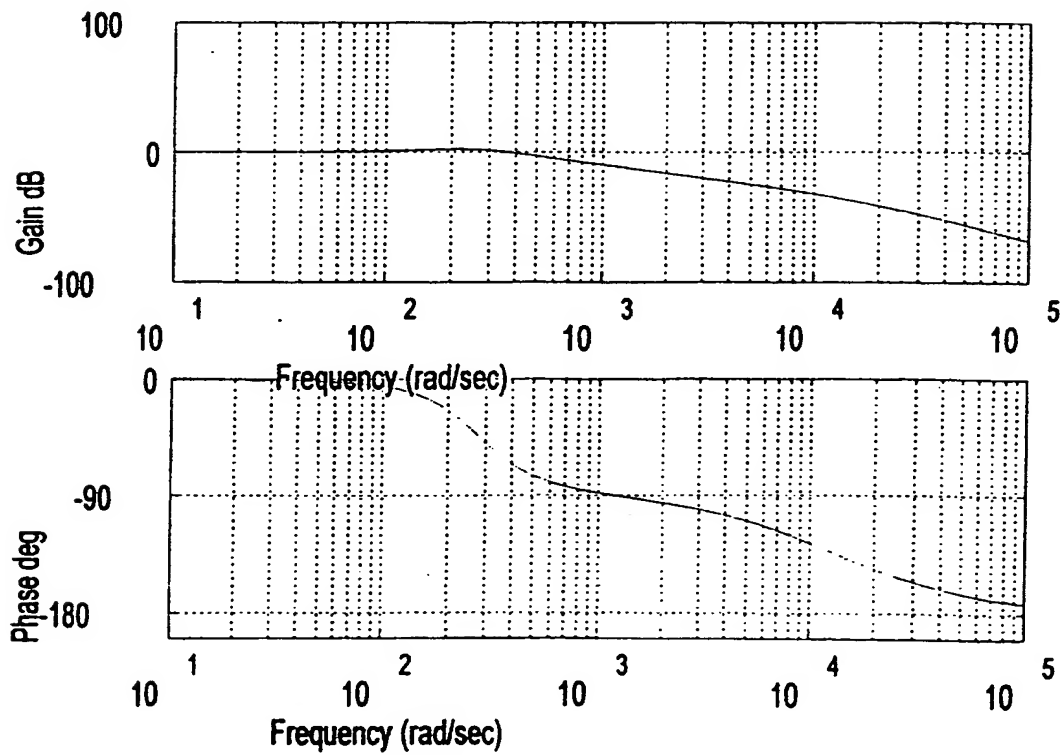


Fig. 11





9/13

Fig. 12

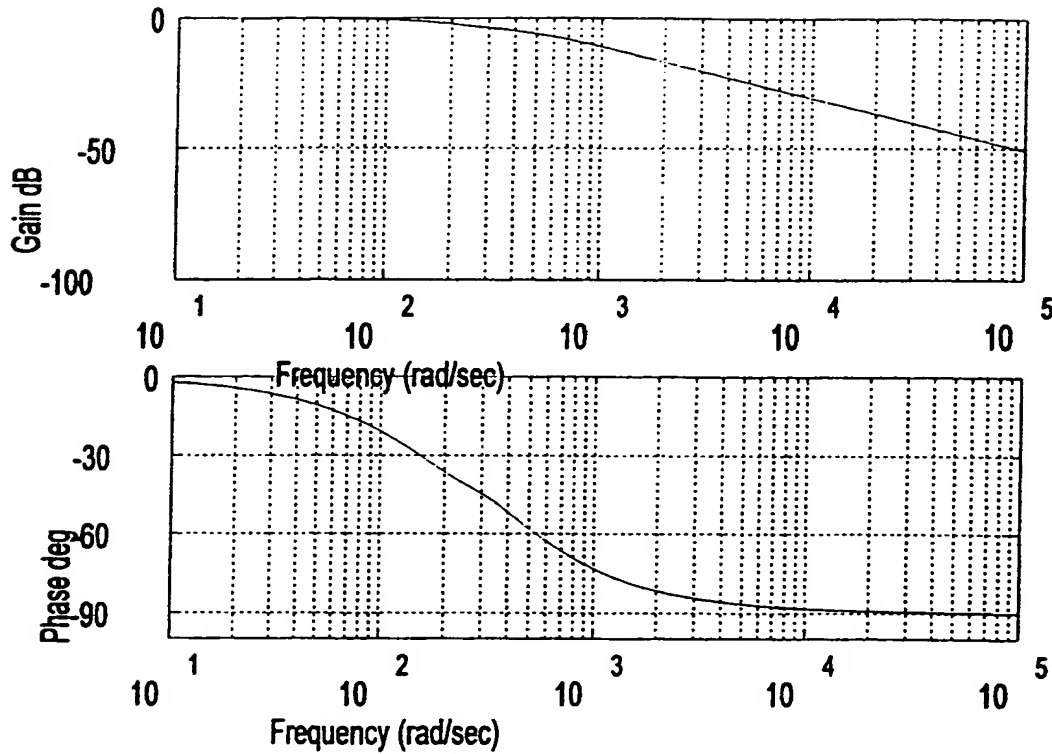
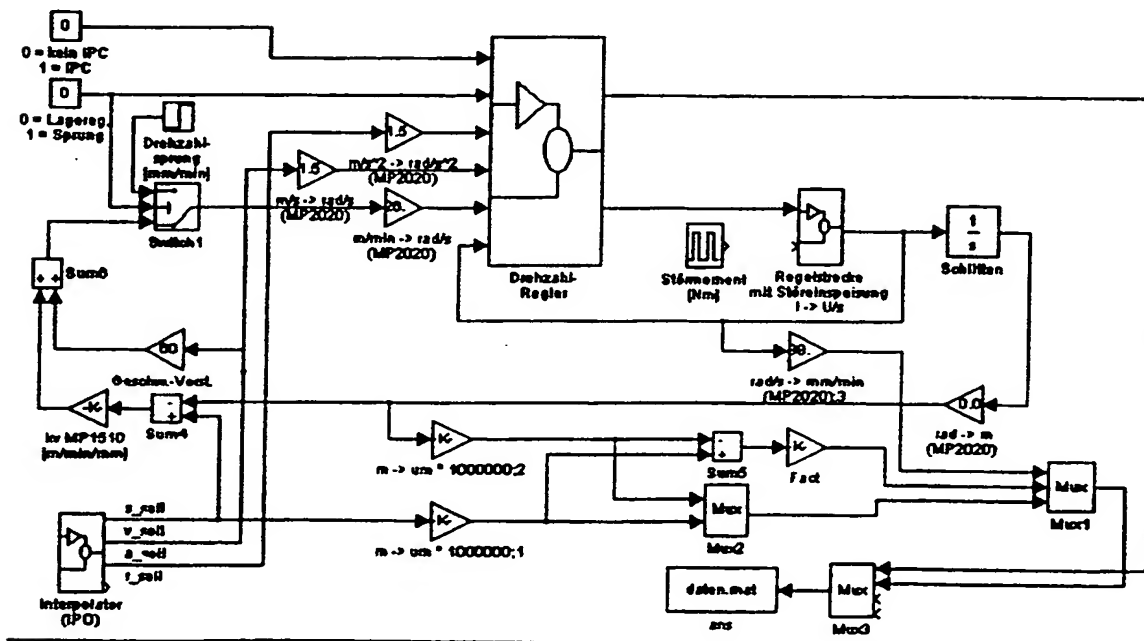


Fig. 13





10/13

Fig. 14

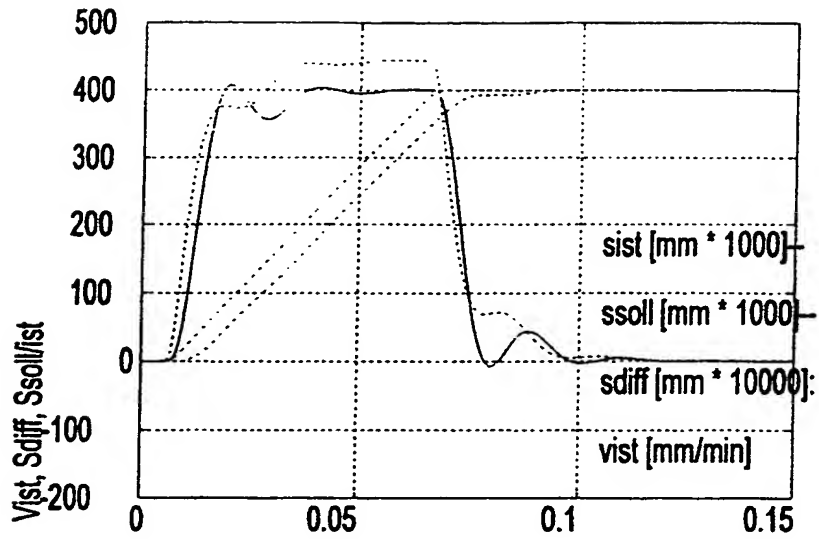
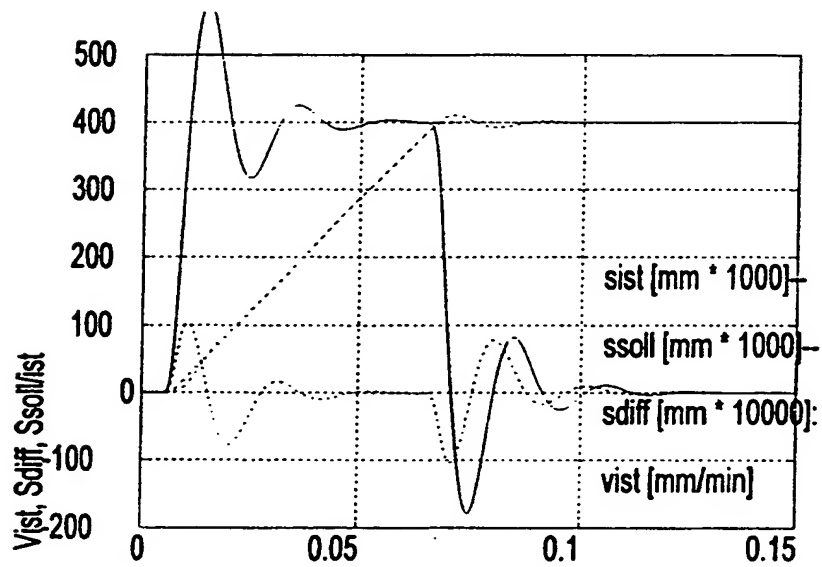
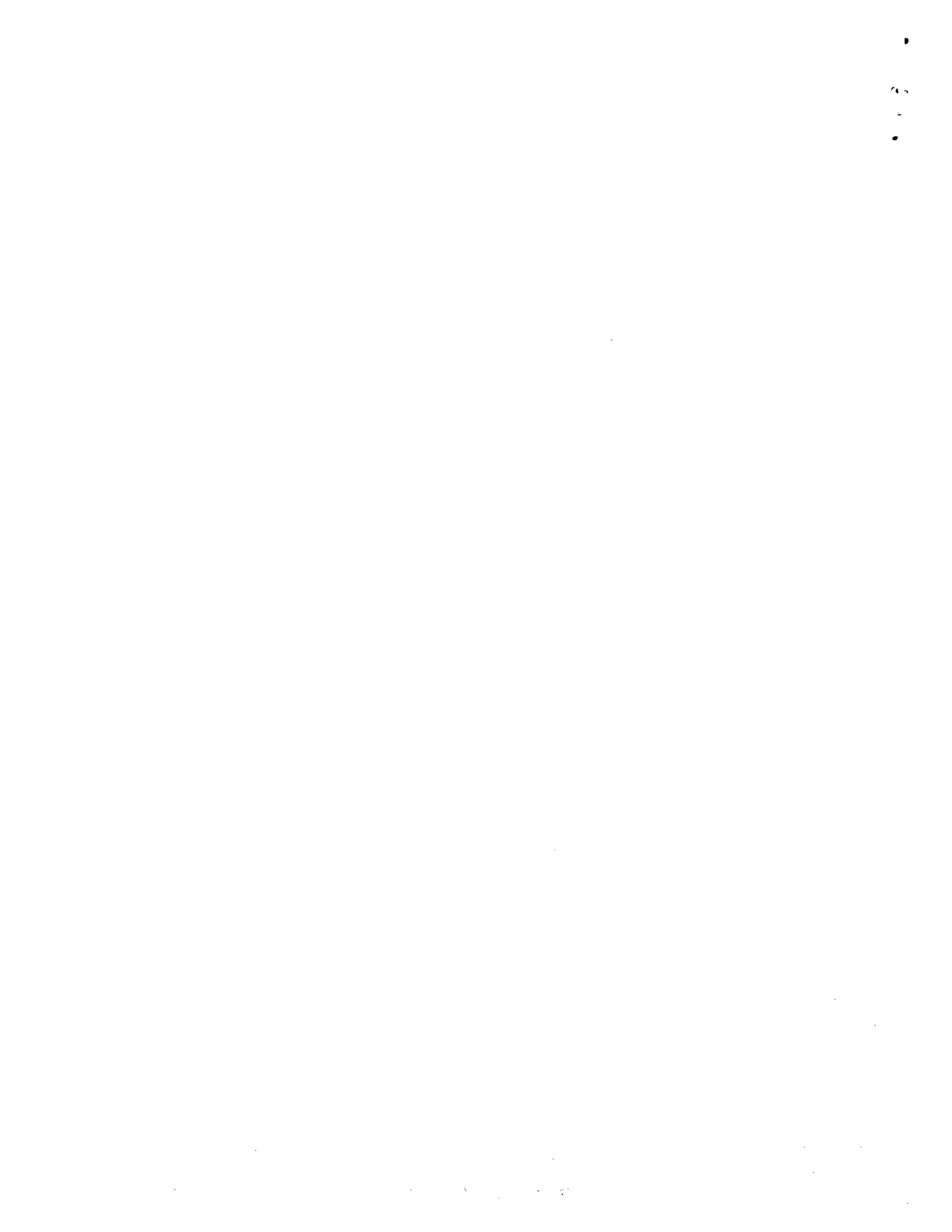


Fig. 15





11/13

Fig. 16

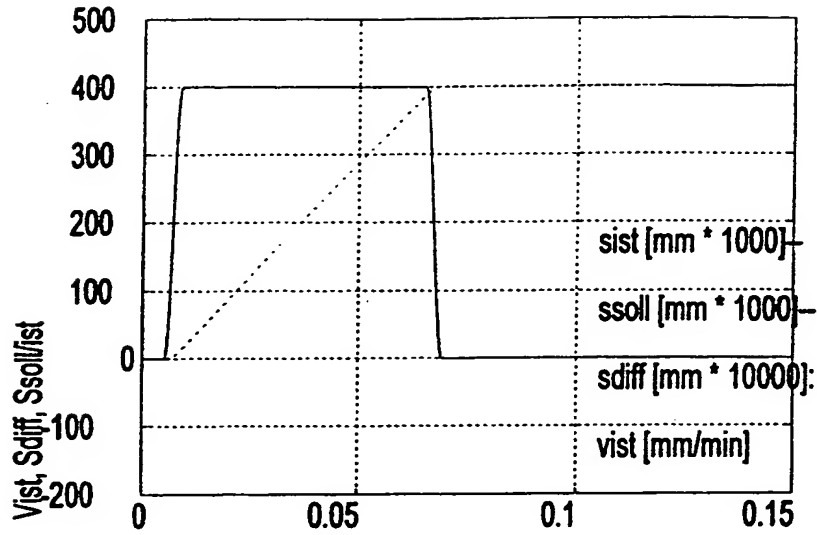


Fig. 17

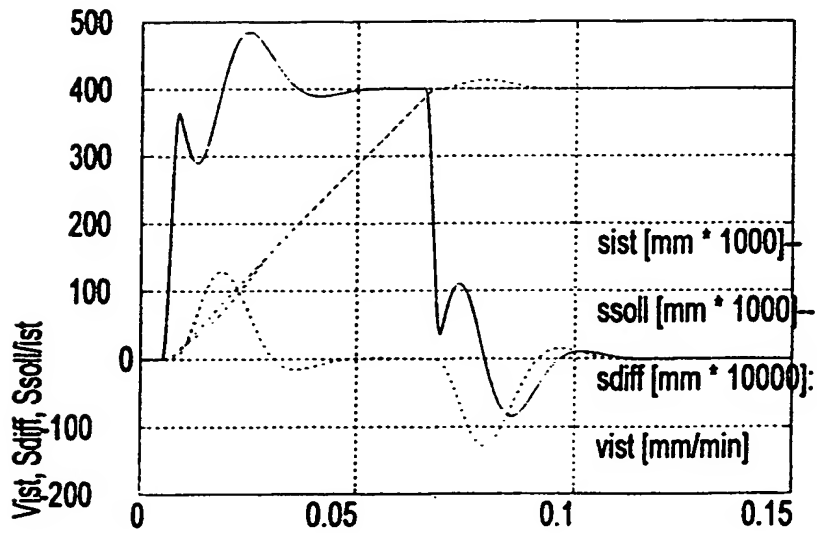






Fig. 18

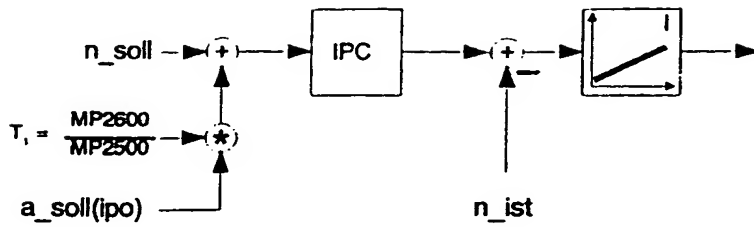


Fig. 19

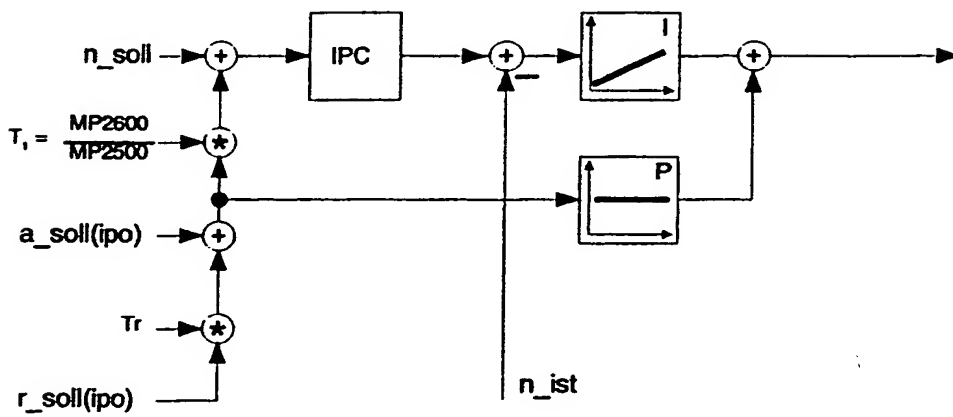


Fig. 20

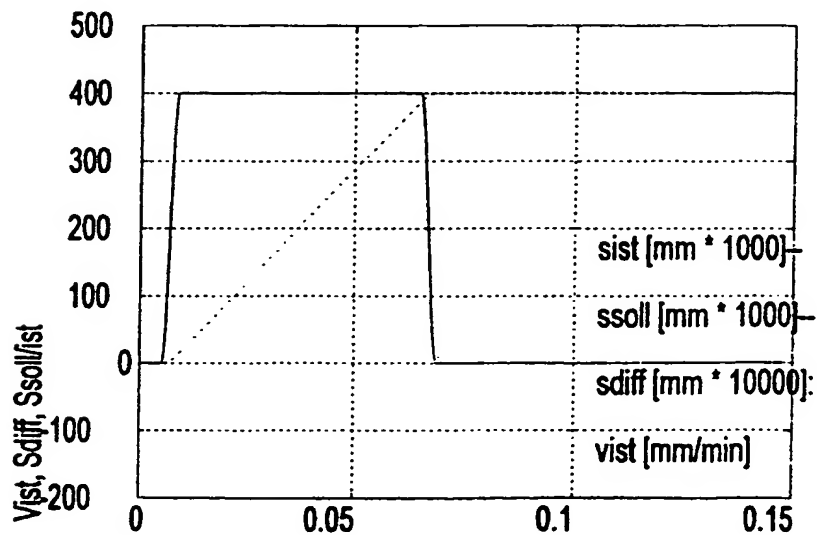
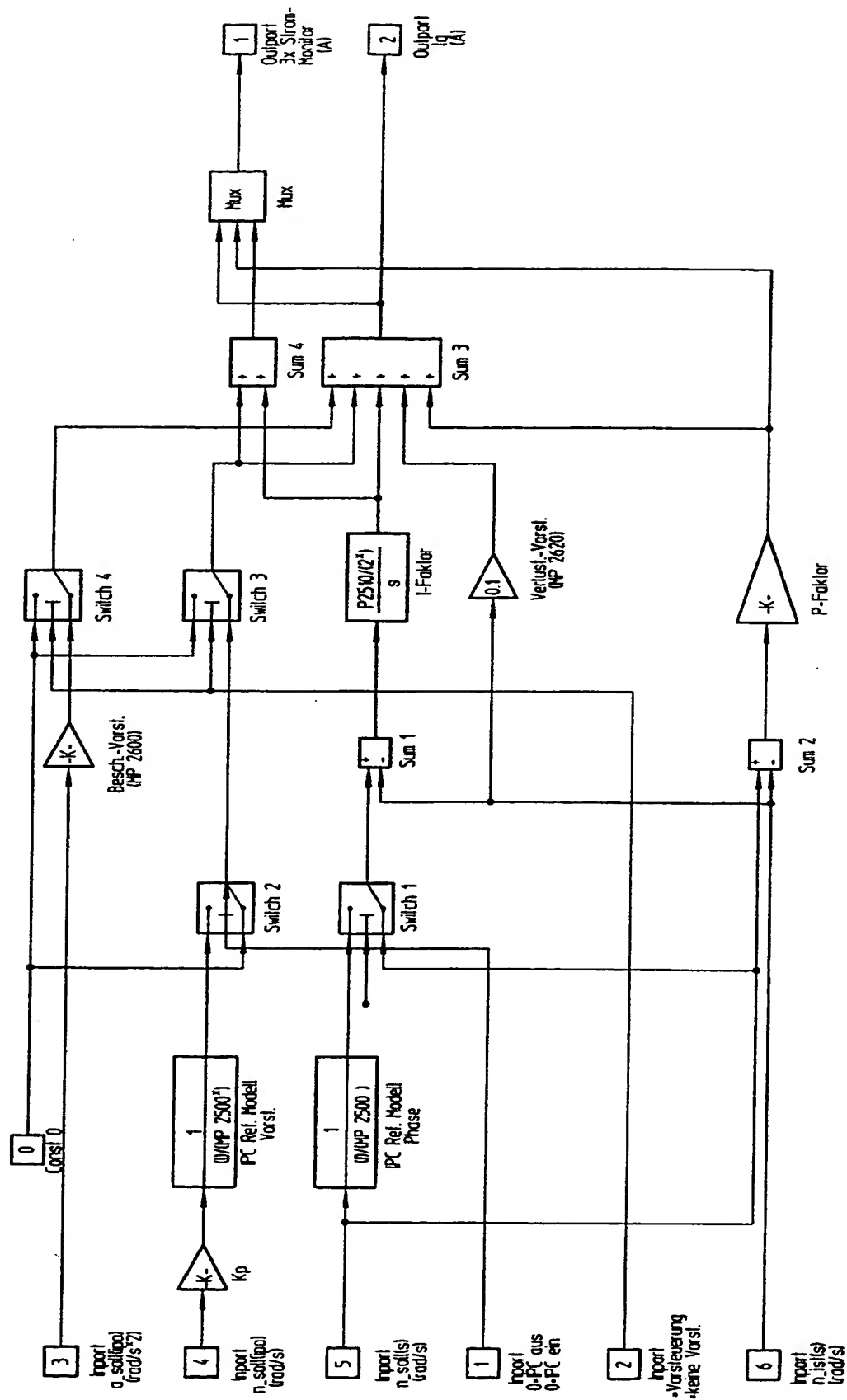




FIG. 21

13/13





# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Int .tional Application No

PCT/EP 00/09232

**A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER**  
IPC 7 G05B13/04

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

**B. FIELDS SEARCHED**

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

IPC 7 G05B

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used)

EPO-Internal, WPI Data

**C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT**

Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	OTT M G ET AL: "AUTO-TUINING: FROM ZIEGLER-NICHOLS TO MODEL BASED RULES" , ADVANCES IN INSTRUMENTATION AND CONTROL,US,INSTRUMENT SOCIETY OF AMERICA, RESEARCH TRIANGLE PARK, VOL. 50, NR. PART 02, PAGE(S) 323-332 XP000540648 ISSN: 1054-0032 the whole document	1,2,5, 13-16
X	US 4 549 123 A (HAEGGLUND TORE ET AL) 22 October 1985 (1985-10-22) column 3, line 5 -column 8, line 9; figures 1,3	1,13-16
A	EP 0 896 263 A (HEIDENHAIN GMBH DR JOHANNES) 10 February 1999 (1999-02-10) abstract	1-16

---  
-/--

☒ Further documents are listed in the continuation of box C.

☒ Patent family members are listed in annex.

\* Special categories of cited documents :

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier document but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance: the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance: the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art.

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

1 February 2001

Date of mailing of the international search report

13/02/2001

Name and mailing address of the ISA

European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2  
NL - 2280 HV Rijswijk  
Tel (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,  
Fax (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Tran-Tien, T

# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Int lional Application No

PCT/EP 00/09232

## C.(Continuation) DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	DE 38 11 086 A (HITACHI LTD) 20 October 1988 (1988-10-20) abstract	1-16
A	US 5 157 597 A (IWASHITA YASUSUKE) 20 October 1992 (1992-10-20) abstract	1-16
P,A	WO 00 22485 A (HEIDENHAIN GMBH DR JOHANNES) 20 April 2000 (2000-04-20) abstract	1-16

# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

Int. Application No

PCT/EP 00/09232

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
US 4549123 A	22-10-1985	SE 427508 B AT 38103 T DE 3279134 D DK 154183 A,B, EP 0099362 A FI 833323 A,B, JP 58501342 T NO 831435 A NO 160632 B SE 8104989 A WO 8300753 A	11-04-1983 15-11-1988 24-11-1988 07-04-1983 01-02-1984 19-09-1983 11-08-1983 22-04-1983 30-01-1989 25-02-1983 03-03-1983
EP 0896263 A	10-02-1999	DE 19734208 A US 6127793 A	11-02-1999 03-10-2000
DE 3811086 A	20-10-1988	JP 63247801 A JP 1046101 A JP 2650918 B JP 1081001 A JP 2585294 B CN 1036278 A,B US 4903192 A	14-10-1988 20-02-1989 10-09-1997 27-03-1989 26-02-1997 11-10-1989 20-02-1990
US 5157597 A	20-10-1992	EP 0401383 A WO 9007735 A JP 2261083 A JP 2587701 B	12-12-1990 12-07-1990 23-10-1990 05-03-1997
WO 0022485 A	20-04-2000	DE 19846637 A	13-04-2000

100



# INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP 00/09232

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES  
IPK 7 G05B13/04

Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPK) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPK

## B. RECHERCHIERTE GEBIETE

Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)

IPK 7 G05B

Recherchierte aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen

Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe)

EPO-Internal, WPI Data

## C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
X	OTT M G ET AL: "AUTO-TUINING: FROM ZIEGLER-NICHOLS TO MODEL BASED RULES" , ADVANCES IN INSTRUMENTATION AND CONTROL, US, INSTRUMENT SOCIETY OF AMERICA, RESEARCH TRIANGLE PARK, VOL. 50, NR. PART 02, PAGE(S) 323-332 XP000540648 ISSN: 1054-0032 das ganze Dokument	1,2,5, 13-16
X	US 4 549 123 A (HAEGGLUND TORE ET AL) 22. Oktober 1985 (1985-10-22) Spalte 3, Zeile 5 -Spalte 8, Zeile 9; Abbildungen 1,3	1,13-16
A	EP 0 896 263 A (HEIDENHAIN GMBH DR JOHANNES) 10. Februar 1999 (1999-02-10) Zusammenfassung	1-16
	--- -/-	

☒ Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen

☒ Siehe Anhang Patentfamilie

\* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen :

\*A\* Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist

\*E\* älteres Dokument, das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist

\*L\* Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt)

\*O\* Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht

\*P\* Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist

\*T\* Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist

\*X\* Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden

\*Y\* Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren anderen Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist

\*Z\* Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist

Datum des Abschlusses der internationalen Recherche

1. Februar 2001

Abmeldedatum des internationalen Recherchenberichts

13/02/2001

Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde  
Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentaan 2  
NL - 2280 HV Rijswijk  
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,  
Fax: (+31-70) 340-3016

Bevollmächtigter Bediensteter

Tran-Tien, T

# INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Int. Nationales Aktenzeichen

PCT/EP 00/09232

## C.(Fortsetzung) ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
A	DE 38 11 086 A (HITACHI LTD) 20. Oktober 1988 (1988-10-20) Zusammenfassung -----	1-16
A	US 5 157 597 A (IWASHITA YASUSUKE) 20. Oktober 1992 (1992-10-20) Zusammenfassung -----	1-16
P, A	WO 00 22485 A (HEIDENHAIN GMBH DR JOHANNES) 20. April 2000 (2000-04-20) Zusammenfassung -----	1-16

# INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP 00/09232

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
US 4549123 A	22-10-1985	SE 427508 B AT 38103 T DE 3279134 D DK 154183 A,B, EP 0099362 A FI 833323 A,B, JP 58501342 T NO 831435 A NO 160632 B SE 8104989 A WO 8300753 A	11-04-1983 15-11-1988 24-11-1988 07-04-1983 01-02-1984 19-09-1983 11-08-1983 22-04-1983 30-01-1989 25-02-1983 03-03-1983
EP 0896263 A	10-02-1999	DE 19734208 A US 6127793 A	11-02-1999 03-10-2000
DE 3811086 A	20-10-1988	JP 63247801 A JP 1046101 A JP 2650918 B JP 1081001 A JP 2585294 B CN 1036278 A,B US 4903192 A	14-10-1988 20-02-1989 10-09-1997 27-03-1989 26-02-1997 11-10-1989 20-02-1990
US 5157597 A	20-10-1992	EP 0401383 A WO 9007735 A JP 2261083 A JP 2587701 B	12-12-1990 12-07-1990 23-10-1990 05-03-1997
WO 0022485 A	20-04-2000	DE 19846637 A	13-04-2000

11